Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

Занимательная механика

ОНТИ 1937

Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

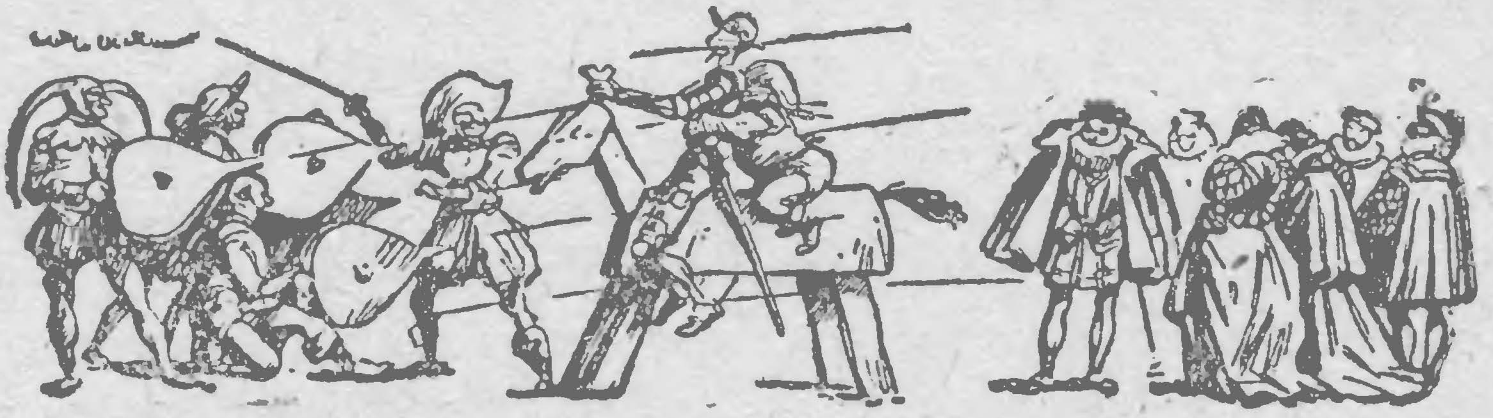
Издание четвертое

Главная редакция
научно-популярной и юношеской литературы
Москва 1937 Ленинград

„Занимательная механика" Я. И. Перельмана, как и многочисленные другие книги этого писателя, излагает вопросы теоретической и прикладной механики на живых примерах, сравнениях и фактах обыденной жизни. Сложные проблемы изложены с присущей автору наглядностью и ясностью, что делает эту книгу весьма занимательной как для юного читателя, так и для взрослого, который с большим интересом познакомится по этой книге с основными элементами механики.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.



Глава первая

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

ЗАДАЧА О ДВУХ ЯЙЦАХ

Держа в руках яйцо, вы ударяете по нему другим. Оба яйца одинаково прочны и сталкиваются одинаковыми частями. Которое из них должно разбиться: ударяемое или ударяющее?

Вопрос поставлен был несколько лет назад американским журналом «Наука и изобретения». Журнал утверждал, что, согласно опыту, разбивается чаще «то яйцо, которое двигалось», другими словами — яйцо ударяющее.

«Скорлупа яйца, — пояснялось в журнале, — имеет кривую форму, причем давление, приложенное при ударе к неподвижному яйцу, действует на его скорлупу снаружи; но известно, что, подобно всякому своду, яичная скорлупа хорошо противостоит давлению извне. Иначе обстоит дело, когда усилие приложено к яйцу движущемуся. В этом случае движущееся содержимое яйца напирает в момент удара на скорлупу изнутри. Свод противостоит такому давлению гораздо слабее, чем напору снаружи, и — проламывается».

Когда та же задача была предложена мной в распространенной ленинградской газете, решения поступили крайне разнообразные.

Одни из решающих доказывали, что разбиться должно непременно ударяющее яйцо; другие — что именно оно-то и уцелеет. Доводы казались одинаково правдоподобными, и тем не менее оба утверждения — в корне ошибочны! Установить рассуждением, которое из соударяющихся яиц должно разбиться, вообще невозможно, потому что между яйцами ударяющим и ударяемым различия не

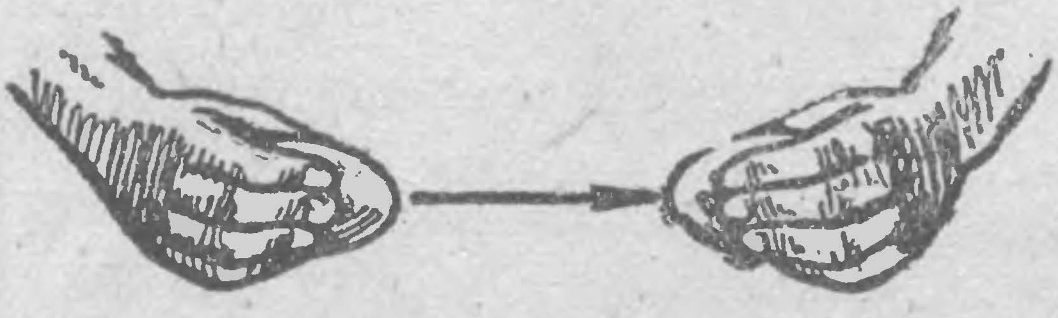


Рис. 1. Которое яйцо сломается?

существует. Нельзя ссылаться на то, что ударяющее яйцо движется, а ударяемое неподвижно. Неподвижно — по отношению к чему? Если к земному шару, то ведь известно, что планета наша сама перемещается среди звезд, совершая десяток разнообразных движений; все эти движения «ударяемое» яйцо разделяет так же, как и «ударяющее», и никто не скажет, которое из них движется среди звезд быстрее. Чтобы предсказать судьбу яиц по признакам движения и покоя, понадобилось бы переворошить всю астрономию и определить движение каждого из соударяющихся яиц относительно неподвижных звезд. Да и это не помогло бы, потому что отдельные видимые звезды тоже движутся, и вся их совокупность, Млечный Путь, перемещается по отношению к иным звездным скоплениям.

Яичная задача, как видите, увлекла нас в бездны мироздания и все же не приблизилась к разрешению.

Впрочем, нет, — приблизилась, если звездная экскурсия помогла нам понять ту важную истину, что движение тела без указания другого тела, к которому это движение относится, есть попросту бессмыслица. Одинокое тело, само по себе взятое, двигаться не может; могут перемещаться только два тела — взаимно сближаться или взаимно удаляться. Оба соударяющихся яйца находятся в одинаковом состоянии движения: они взаимно сближаются, — вот все, что мы можем сказать об их движении. Результат столкновения не зависит от того, какое из них пожелаем мы считать неподвижным и какое — движущимся.

Триста лет назад впервые провозглашена была Галилеем относительность равномерного движения и покоя, их полная равнозначность. Этот «принцип относительности классической механики» не следует смешивать с «принципом относительности Эйнштейна», выдвинутым уже на глазах нынешнего поколения и представляющим дальнейшее развитие первого принципа. Об учении Эйнштейна речь будет в последней главе нашей книги; но для его понимания необходимо хорошо уяснить себе главные следствия галилеева принципа.

ПУТЕШЕСТВИЕ НА ДЕРЕВЯННОМ КОНЕ

Из сейчас сказанного следует, что состояние равномерного прямолинейного движения неотличимо от состояния неподвижности при условии обратного равномерного и прямолинейного движения окружающей обстановки. Сказать: «тело движется с постоянной скоростью» и: «тело находится в покое, но все окружающее равномерно движется в обратную сторону» — значит утверждать одно и то же. Строго говоря, мы не должны говорить ни так, ни этак, а должны говорить, что тело и обстановка движутся одно относительно другой. Мысль эта еще и в наши дни усвоена далеко не всеми, кто имеет дело с механикой и физикой. А между тем она не чужда была уже автору «Дон-Кихота», жившему три столетия назад и не читавшему Галилея. Ею проникнута одна из забавных сцен произведения Сервантеса — описание путешествия прославленного рыцаря и его оруженосца на деревянном коне.

«— Садитесь на круп лошади, — объяснили Дон-Кихоту. — Требуется лишь одно: повернуть втулку, вделанную у коня на шее, и он унесет вас по воздуху туда, где ожидает вас Маламбумо. Но чтобы высота не вызвала головокружения, надо ехать с завязанными глазами.

«Обоим завязали глаза, и Дон-Кихот дотронулся до втулки».

Окружающие стали уверять рыцаря, что он уже несется по воздуху «быстрее стрелы».

«— Готов клясться, — заявил Дон-Кихот оруженосцу, что во всю жизнь мою не ездил я на коне с более спокойной поступью. Все идет, как должно итти, и ветер дует.

«— Это верно, — сказал Санчо, — я чувствую такой свежий воздух, точно на меня дуют из тысячи мехов.

«Так на самом деле и было, потому что на них дули из нескольких больших мехов».

Деревянный конь Сервантеса — прообраз многочисленных аттракционов, придуманных в наше время для развлечения публики на выставках и в парках. То и другое основано на полной невозможности отличить состояние покоя от равномерного движения.

ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ И МЕХАНИКА

Многие привыкли противополагать покой движению, как небо — земле и огонь — воде. Это не мешает им, впрочем, устраиваться в вагоне на ночлег, ни мало не заботясь о том, стоит ли поезд, или мчится. Но в теории те же люди зачастую убежденно оспаривают право считать мчащийся поезд неподвижным, а рельсы, землю под ними и всю окрестность — движущимися в противоположном направлении.

«Допускается ли такое толкование здравым смыслом машиниста? — спрашивает Эйнштейн, излагая эту точку зрения. — Машинист возразит, что он топит и смазывает не окрестность, а паровоз; следовательно, на паровозе должен сказаться и результат его работы, т. е. движение».

Довод представляется на первый взгляд очень сильным, едва ли не решающим. Однако вообразите, что рельсовый путь проложен вдоль экватора и поезд мчится на запад, против вращения земного шара. Тогда окрестность будет бежать навстречу поезду, и топливо будет расходоваться лишь на то, чтобы мешать паровозу увлекаться назад, — вернее, чтобы помогать ему хоть немного отставать от движения окрестности на восток. Пожелай машинист удержать поезд совсем в покое (относительно солнца), он должен был бы топить и смазывать паровоз так, как нужно для скорости две тысячи километров в час.

Чтобы убедить тех, кто еще сомневается в законности взаимной замены «покоя» и «движения», приведу слова одного из немногих противников учения Эйнштейна, проф. Ленарда; критикуя Эйнштейна, он не посягает, однако, на теорию относительности Галилея. Вот что он пишет:

«Пока движение поезда остается вполне равномерным, нет никакой возможности определить, что именно находится в движении и что в покое: поезд или окрестность. Устройство материального мира таково, что всегда во всякий данный момент исключает возможность абсолютного решения вопроса о наличии равномерного движения или покоя и оставляет место только для изучения равномерного движения тел относительно друг друга, так как участие наблюдателя в равномерном движении не отражается на наблюдаемых явлениях и их законах».

ПОЕДИНОК НА КОРАБЛЕ

Можно представить себе такую обстановку, к которой иные, пожалуй, затруднятся практически применить принцип относительности. Вообразите, например, на палубе движущегося судна двух стрелков, направивших друг в друга свое оружие. Поставлены ли оба противника в строго одинаковые условия? Не в праве ли стрелок, стоящий спиной к носу корабля, жаловаться на то, что пущенная им пуля летит медленнее, чем пуля противника?

Конечно, по отношению к воде моря, пуля, пущенная против движения корабля, летит медленнее, чем на неподвижном судне, а пуля, направленная к носу, летит быстрее. Но это нисколько не нарушает условий поединка: пуля, направленная к корме, летит к мишени, которая движется ей навстречу, так что при равномерном движении судна недостаток скорости пули как раз восполняется встречной скоростью мишени; пуля же, направленная к носу, догоняет свою мишень, которая удаляется от пули со скоростью, равной избытку скорости пули.

В конечном итоге обе пули по отношению к своим мишеням движутся совершенно так же, как и на корабле неподвижном.

Не мешает прибавить, что все сказанное относится только к такому судну, которое идет по прямой линии и притом с постоянной скоростью.

Здесь уместно будет привести отрывок из той книги Галилея, где был впервые высказан классический принцип относительности (книга эта, к слову сказать, едва не привела ее автора на костер инквизиции).

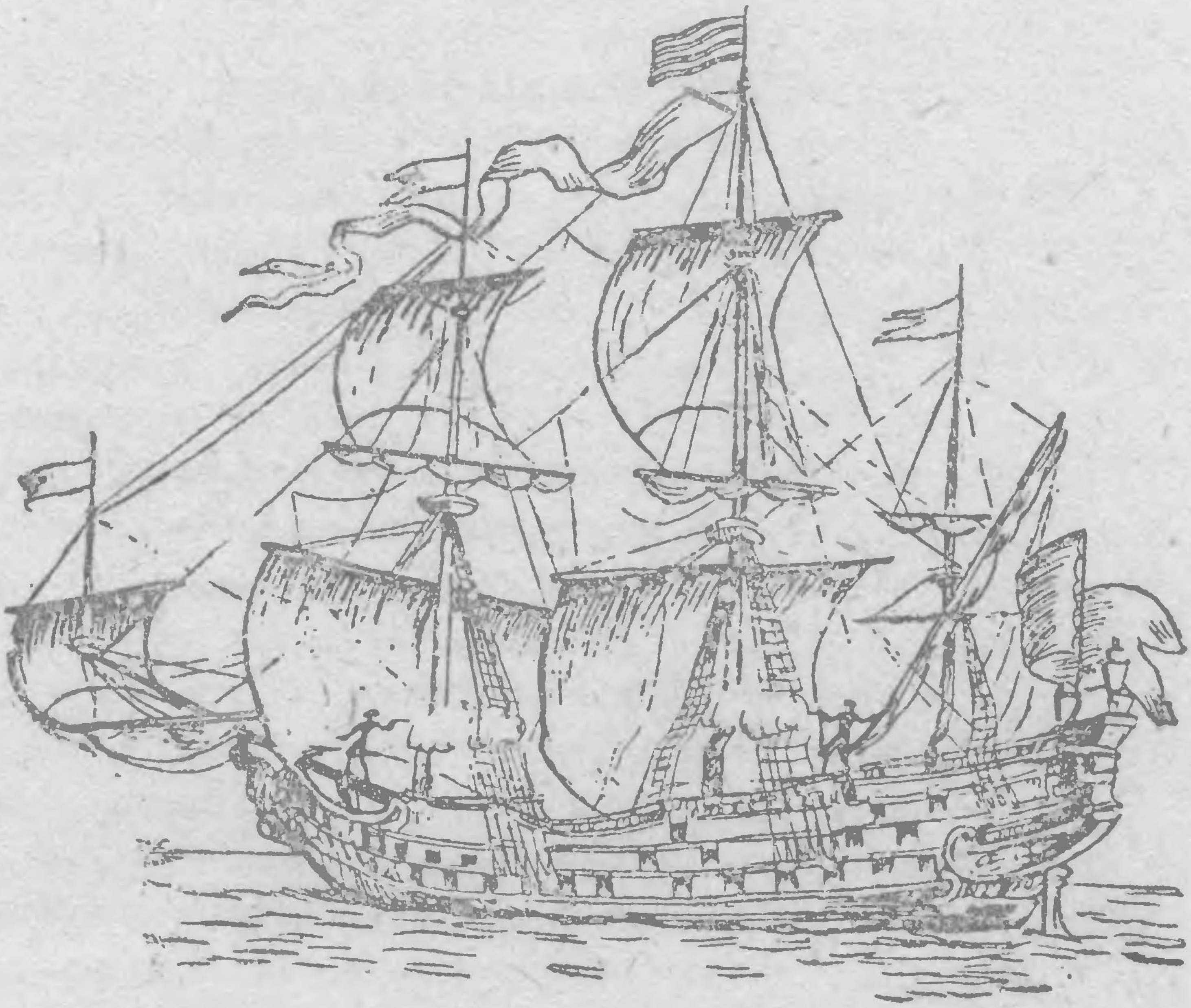


Рис. 2. Чья пуля раньше достигнет противника?

«Заключите себя с приятелем в просторное помещение под палубой большого корабля. Если движение корабля будет равномерным, то вы ни по одному действию не в состоянии будете судить, движется ли корабль, или стоит на месте. Прыгая, вы будете покрывать по полу те же самые расстояния, как и на неподвижном корабле. Вы не сделаете вследствие быстрого движения корабля бо́льших прыжков к корме, чем к носу корабля, — хотя, пока вы находитесь в воздухе, пол под вами бежит

к части, противоположной прыжку. Бросая вещь товарищу, вам не нужно с бо́льшей силой кидать ее от кормы к носу, чем наоборот... Мухи будут летать во все стороны, не держась преимущественно той стороны, которая ближе к корме» и т. д.

Теперь понятна та форма, в которой обычно высказывается классический принцип относительности: «все движения, совершающиеся в какой-либо системе, не зависят от того, находится ли система в покое, или перемещается прямолинейно и равномерно».

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА

На практике иной раз оказывается чрезвычайно полезным заменять движение покоем и покой движением, опираясь на классический принцип относительности. Чтобы изучить, как действует на самолет или на автомобиль сопротивление воздуха, сквозь который они движутся, обычно исследуют «обращенное» явление: действие движущегося потока воздуха на покоящийся самолет. В лаборатории устанавливают широкую аэродинамическую трубу (рис. 3), устраивают в ней ток воздуха и изучают его действие на неподвижно подвешенную модель аэроплана или автомобиля. Добытые результаты с успехом прилагают к практике, хотя в действительности явление протекает как раз наоборот: воздух неподвижен, а аэроплан или автомобиль прорезают его с большой скоростью.

Читателю будет интересно узнать, что одна из крупнейших в мире аэродинамических труб устроена у нас в Москве, в Центральном аэро-гидродинамическом институте (сокращенное обозначение: ЦАГИ). Она имеет восьмиугольную форму; длина ее 50 *м*, а поперечник в рабочей части 6 *м*. Благодаря таким размерам в ней умещается не уменьшенная лишь модель, а корпус настоящего аэроплана с пропеллером или целый автомобиль в натуральную величину. Более крупная аэродинамическая труба сооружена недавно во Франции: ее эллиптическое сечение имеет размеры 18 $м \times 16$ $м$.

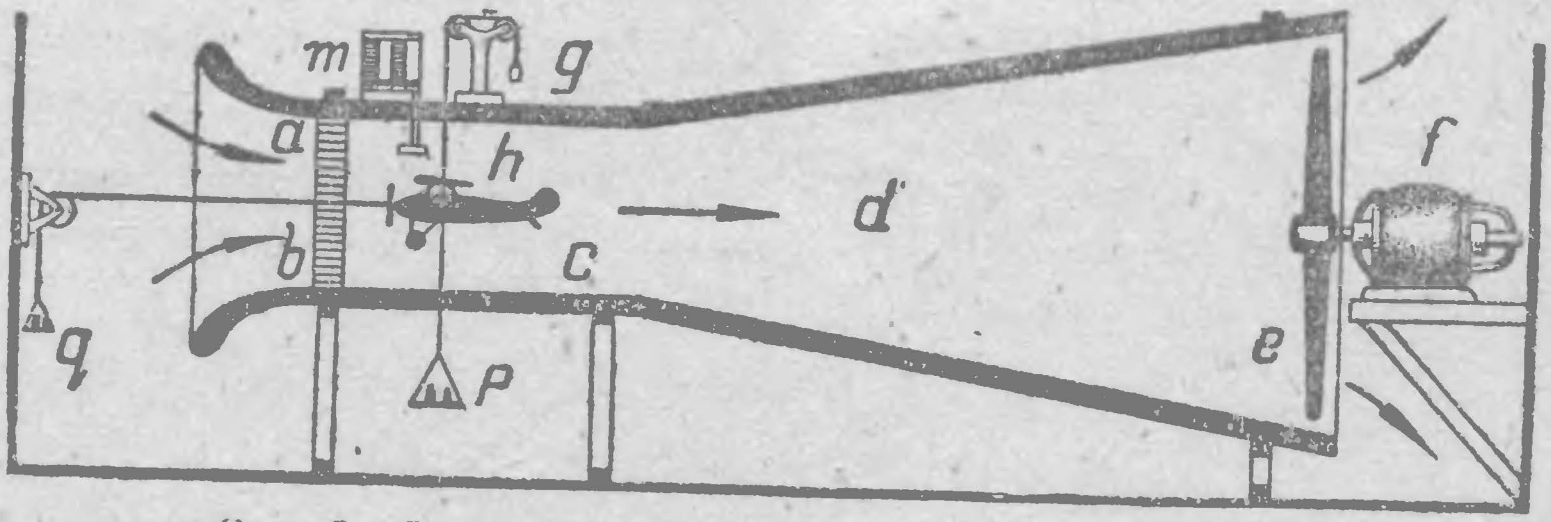


Рис. 3. Разрез аэродинамической трубы ЦАГИ.

Воздух засасывается в трубку пропеллером e через решетку (f—электродвигатель). Действие тока воздуха на аэроплан изучается помощью приборов p, g, m. Подвес q—так называемые аэродинамические весы—уравновешивает давление воздушного потока.

НА ПОЛНОМ ХОДУ ПОЕЗДА

Другой пример плодотворного применения классического принципа относительности беру из заграничной железнодорожной практики. В Англии и в Америке тендер нередко пополняется водой на полном ходу поезда. Достигается это остроумным «обращением» одного общеизвестного механического явления, а именно: если в поток воды погрузить отвесно трубку, нижний конец которой загнут против течения (рис. 4), то текущая вода проникает в эту так называемую «трубку Пито» и устанавливается в ней выше уровня реки на определенную величину H, зависящую от скорости течения. Железнодорожные инженеры «обратили» это явление: они двигают загнутую трубку в стоячей воде, — и вода в трубке поднимается выше уровня водоема. Движение заменяют покоем, а покой движением.

Осуществляют это так, что на станции, где тендер паровоза должен, не останавливаясь, запастись водой, устраивают между рельсами длинный водоем в виде канавы (рис. 4). С тендера спускают изогнутую трубу, обращенную отверстием в сторону движения. Вода,

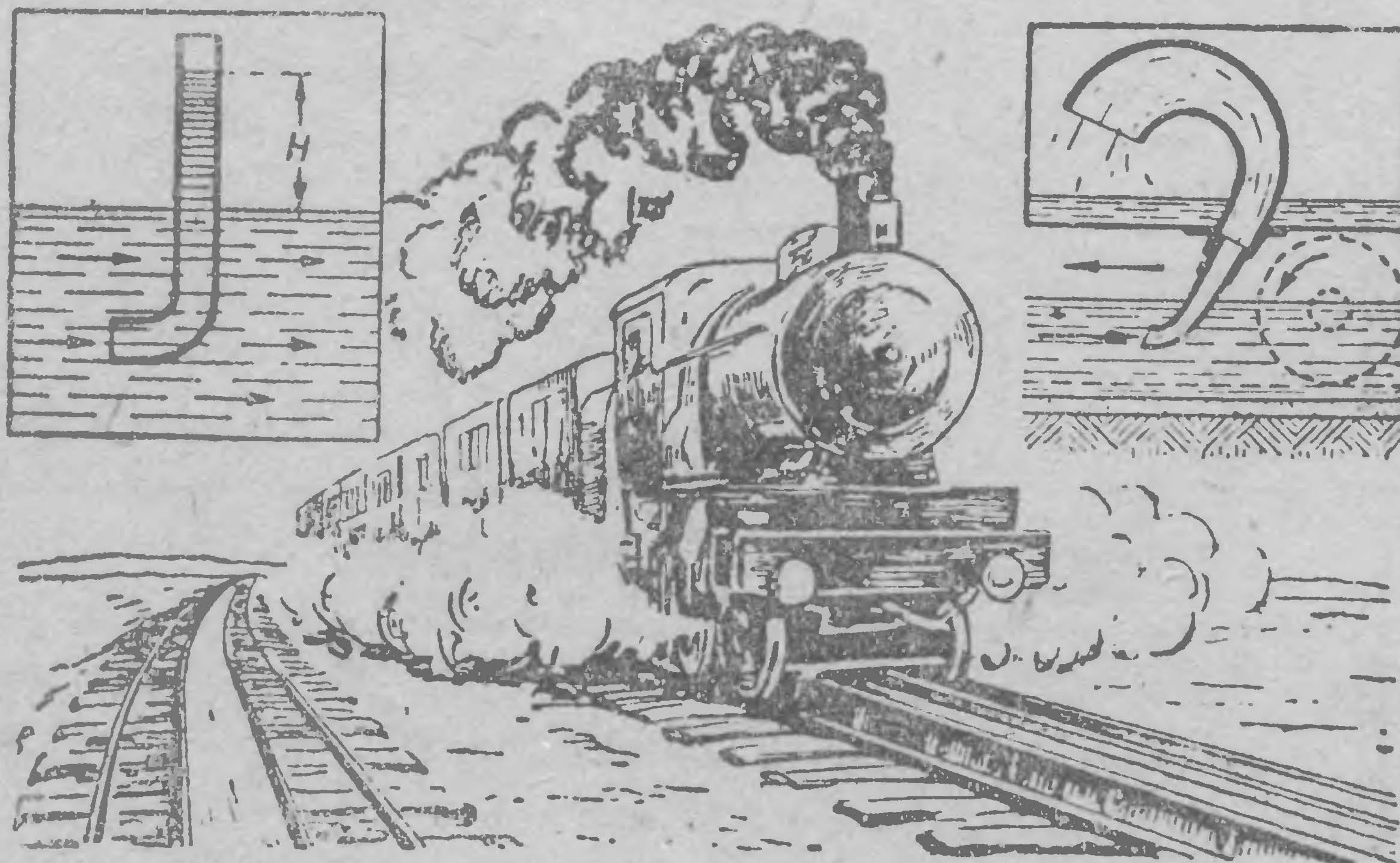


Рис. 4. Как паровозы в Америке на полном ходу набирают воду. Между рельсами устроен длинный водоем, в который погружается из тендера труба.

Вверху налево—труба Пито. При погружении ее в текущую воду уровень в трубе поднимается выше, чем в водоеме.
Вверху направо—применение трубы Пито для набора воды в тендер движущегося поезда.

поднимаясь в трубе, подается в тендер быстро мчащегося поезда (рис. 4 вверху направо).

Как высоко может быть поднята вода этим оригинальным способом? По законам той отрасли механики, которая носит название «гидравлики» и занимается движением жидкостей, вода в трубе Пито должна подняться на такую же высоту, на какую взлетело бы вверх тело, подброшенное отвесно со скоростью течения воды; а эта высота (H) определяется формулой:

$$H = \frac{V^2}{2g},$$

где V — скорость воды, а g — ускорение силы тяжести, равное 9,8 *м* в секунду за секунду. В нашем случае скорость воды по отношению к трубе равна скорости поезда; взяв скромную скорость 36 *км* в час, имеем $V = 10$ *м* в секунду; следовательно, высота поднятия воды

$$H = \frac{V^2}{2 \times 9{,}8} = \frac{100}{2 \times 9{,}8} = \text{около } 5 \text{ м}.$$

Ясно, что каковы бы ни были потери на трение, высота поднятия более чем достаточна для успешного наполнения тендера [1].

КОПЕРНИК И ПТОЛЕМЕЙ

У читателя, без сомнения, уже родился вопрос: как же с точки зрения классического принципа относительности надо разрешать спор Коперника и Птолемея о движении Земли? Хотя в этом случае речь идет не о прямолинейном движении, и следовательно, вопрос попадает в область учения Эйнштейна, мы все же не оставим его здесь без рассмотрения.

Итак, — что вокруг чего обращается [2]: Земля вокруг Солнца, или Солнце вокруг Земли?

Такая постановка вопроса неправильна. Спрашивать,

[1] В «Занимательной физике» (кн. 2-я) я применил тот же прием «обращения» к случаю взаимного притяжения кораблей на море. Это вызвало возражение оттуда, откуда меньше всего можно было его ожидать: со стороны специалиста-физика, автора брошюры, популяризующей учение Эйнштейна. Он считает «обращение» явления в данном случае незаконным и готов подчиниться лишь свидетельству опыта: «Если опыт даст утвердительный ответ, то я признаю вашу правоту». Каким темпом двигалась бы вперед наука, если бы в каждом частном случае применения общих законов необходимо было обращаться к новым опытам!

[2] Следует в круговом движении различать обращение (вокруг оси, не проходящей через движущееся тело) от вращения (вокруг оси, проходящей через движущееся тело). Земля совершает обращение вокруг Солнца и суточное вращение вокруг оси.

какое из двух указанных движений совершается «в действительности», — бессмысленно: тело может двигаться лишь по отношению к другому телу; двигаться же безотносительно — нельзя. Поэтому на поставленный вопрос надо ответить следующим образом: Земля и Солнце движутся одно относительно другого так, что при наблюдении с Земли Солнце кажется обращающимся вокруг Земли, а при наблюдении с Солнца — Земля кажется обращающейся вокруг Солнца.

Послушаем Эддингтона, выдающегося физика нашего времени: «Простота планетных движений была затемнена птолемеевой схемой и стала ясной в схеме Коперника. Но для обыкновенных земных явлений положение обратное: птолемеева схема позволяет выявиться их естественной простоте. Земная, или птолемеева схема естественно приноровлена к земным явлениям, а солнечная, или коперникова — приноровлена к явлениям солнечной системы; но мы не можем одну из них сделать пригодной для обеих систем, не вводя излишних усложнений».

Вы согласитесь с этим, если вспомните, что ни один астроном, не исключая и самого Коперника, не отказывался от «птолемеевского» выражения: «Солнце восходит» и не заменял его коперниковским: «Земля в своем вращательном движении подставляет лучам Солнца то место, в котором я нахожусь». Для определения времени дня воззрение Птолемея удобнее Коперника, и мы без колебания становимся в этом случае на точку зрения древнего грека. Кто вздумал бы описывать солнечный восход в терминах учения Коперника, тот не сразу был бы понят даже самым убежденным коперниканцем.

Астрономы нашего времени, предвычисляя те или иные небесные явления, часто вовсе не думают о движении земного шара: им удобнее вести расчеты так, как будто все небо обращается вокруг неподвижной Земли[1].

Читатель не забыл вероятно, — а может быть и в самом деле успел забыть, — что поводом к так далеко отвлекшей нас беседе послужила задача об ударяющихся яйцах. Вспомнив об этом, читатель поймет, что если бы по сломанной скорлупе можно было узнавать, какое из яиц находится в «истинном» движении и какое «в абсолютном» покое, то это было бы открытием мирового значения, настоящим переворотом в механике. Американский журнал, беспечно полагавший, что им установлено различие между соударяющимися яйцами, не подозревал, что он находился в преддверии вечной славы.

КАК НАДО ПОНИМАТЬ ЗАКОН ИНЕРЦИИ

Теперь, после того как мы так подробно побеседовали об относительности движения, необходимо сказать несколько слов о тех причинах, которые вызывают движение, — о силах. Прежде всего нужно указать на закон независимости действия сил; он формулируется так: дей-

[1] Один из внимательных читателей поставил предо мной по этому поводу вопрос:

«Какую картину движения увидит наблюдатель, рассматривающий нашу планетную систему извне, с какой-нибудь отдаленной звезды? Будет ли Земля для этого наблюдателя кружиться около Солнца, или наоборот?»

Отвечая на этот вопрос, надо прежде всего вспомнить, что абсолютно неподвижного наблюдательного пункта быть не может. Звезда, откуда смотрит наблюдатель, неподвижна относительно какого-либо другого тела. Если наблюдатель неподвижен относительно Солнца, то он увидит Землю, обращающуюся около Солнца. Если он неподвижен относительно Земли, он увидит Солнце, кружащееся около Земли. Если же он неподвижен относительно какого-либо третьего тела (например другой звезды), то ему представятся движущимися — по тому или иному пути — и Солнце и Земля.

ствие силы на тело не зависит от того, находится ли тело в покое или движется по инерции, либо под влиянием других сил.

Это следствие так называемого «второго» из тех трех законов, которые положены Ньютоном в основу всей механики. Первый — закон инерции; третий — закон противодействия.

Второму закону Ньютона будет посвящена вся следующая глава, поэтому здесь мы скажем о нем всего лишь несколько слов. Смысл этого закона состоит в том, что изменение скорости, мерой которой служит ускорение, пропорционально действующей силе и имеет одинаковое с ней направление. Этот закон можно выразить формулой

$$f = m \cdot a,$$

где f — сила, действующая на тело; m — его масса и a — ускорение тела. Из трех величин, входящих в эту формулу, труднее всего понять, что такое масса. Нередко смешивают ее с весом, но в действительности масса ничего общего с весом не имеет. Массы тел можно сравнивать по тем ускорениям, которые они получают под влиянием одной и той же силы. Как видно из только что написанной формулы, масса при этом должна быть тем больше, чем меньше ускорение, приобретенное телом под влиянием этой силы.

Закон инерции, хотя и противоречит привычным представлениям, наиболее понятен из всех трех[1]. И однако, иные понимают его совершенно превратно. Именно, его формулируют нередко как свойство тел «сохранять

[1] Противоречит он обыденным представлениям в той своей части, которая утверждает, что тело, движущееся равномерно и прямолинейно, не побуждается к этому никакой силой; привычный же взгляд тот, что раз тело движется, оно поддерживается в этом состоянии силой, а при отнятии силы движение должно прекратиться.

свое состояние, пока внешняя причина не нарушит этого состояния». Такое распространенное толкование подменяет закон инерции законом причинности, утверждающим, что ничто не происходит (т. е. никакое тело не изменяет своего состояния) без причины. Подлинный закон инерции относится не ко всякому физическому состоянию тел, а исключительно к состояниям покоя и движения. Он гласит:

Всякое тело сохраняет свое состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока действие сил не выведет его из такого состояния.

Значит каждый раз, когда тело

1) приходит в движение;

2) меняет свое прямолинейное движение на непрямолинейное или вообще движется по кривому пути;

3) прекращает, замедляет или ускоряет свое движение, — мы должны заключить, что на тело действует сила.

Если же ни одной из этих перемен в движении не наблюдается, то на тело никакая сила не действует как бы стремительно оно ни двигалось. Надо твердо помнить, что тело, движущееся равномерно и прямолинейно, не находится вовсе под действием сил (или же все действующие на него силы уравновешиваются). В этом существенное отличие современных механических представлений от взглядов мыслителей древности и средних веков (до Галилея). Здесь обыденное мышление и мышление научное резко расходятся.

Сказанное объясняет нам, между прочим, почему трение о неподвижное тело рассматривается в механике как сила, хотя никакого движения оно вызвать не может.

Трение есть сила потому, что оно замедляет движение. Такие силы, которые сами не могут породить движения, а способны лишь замедлять уже возникшее движение (или уравновешивать другие силы), называются «пассивными» в отличие от сил движущих, или «активных».

Подчеркнем же еще раз, что тела не *стремятся* оставаться в покое, а просто *остаются* в покое. Разница тут та же, что между упорным домоседом, которого трудно извлечь из квартиры, и человеком, случайно находящимся дома, но готовым по малейшему поводу покинуть квартиру. Физические тела по природе своей вовсе не «домоседы»; напротив, они в высшей степени подвижны, так как достаточно приложить к свободному телу хотя бы самую ничтожную силу, — и оно приходит в движение. Выражение «тело *стремится* сохранять покой» еще и потому неуместно, что выведенное из состояния покоя тело само собой к нему не возвращается, а напротив, сохраняет навсегда сообщенное ему движение (при отсутствии, конечно, сил, мешающих движению).

Немалая доля тех недоразумений, которые связаны с законом инерции, обусловлена этим неосторожным словом «стремится», вкравшимся в большинство учебников физики и механики.

Не меньше трудностей для правильного понимания представляет *третий* закон Ньютона, к рассмотрению которого мы сейчас и переходим.

ДЕЙСТВИЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ

Желая открыть дверь, вы тянете ее за ручку к себе. Мышца вашей руки, сокращаясь, сближает свои концы: она с одинаковой силой влечет дверь и ваше туловище одно к другому. В этом случае до наглядности ясно, что между вашим телом и дверью действуют две силы, приложенные одна к двери, другая — к вашему телу. То же самое, разумеется, происходит и в случае, когда дверь открывается не на вас, а от вас: силы расталкивают дверь и ваше тело.

То, что мы наблюдаем здесь для силы мускульной, верно для всякой силы вообще, независимо от того, какой она природы. Каждое напряжение действует в две противоположные стороны; оно имеет, выражаясь образно, два конца (две силы): один приложен к телу, на которое, как мы говорим, **сила действует**; другой приложен к телу, которое мы называем **действующим**. Сказанное принято выражать в механике коротко — слишком коротко для ясного понимания — так: «**действие равно противодействию**».

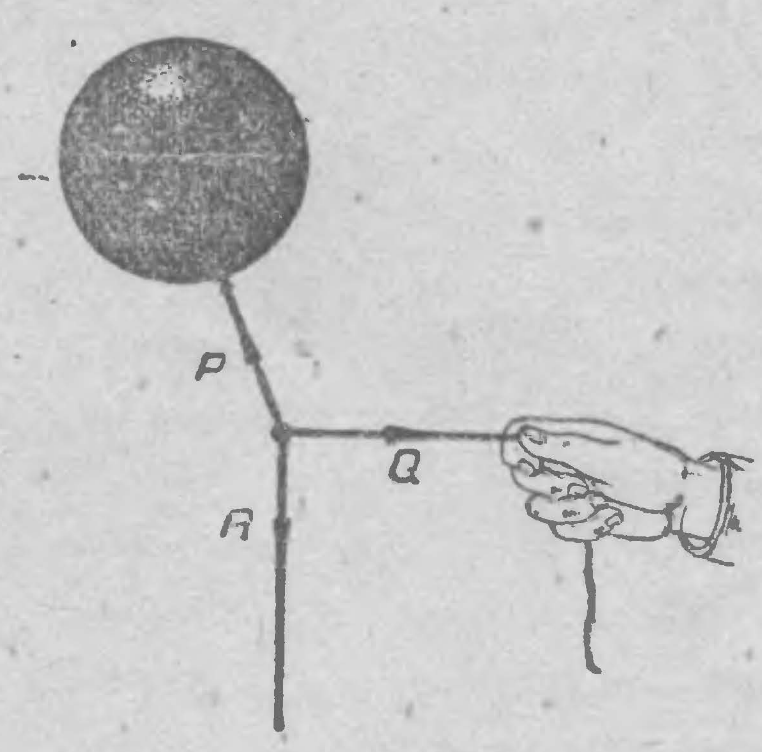


Рис. 5. Силы (P, Q, R), действующие на грузик детского воздушного шара. Где силы противодействующие?

Смысл этого закона состоит в том, что все силы природы — силы двойные. В каждом случае проявления действия силы вы должны представлять себе, что где-то в ином месте имеется другая сила, равная этой, но направленная в противоположную сторону. Эти две силы действуют непременно между двумя точками, стремясь их сблизить или растолкнуть.

Пусть вы рассматриваете (рис. 5) силы P, Q и R, которые действуют на грузик, подвешенный к детскому воздушному шарику. Тяга P шара, тяга Q веревочки и вес R грузика — силы как будто одиночные. Но это лишь отвлечение от действительности; на самом деле для каждой из трех сил имеется равная ей, но противоположная по направлению сила. А именно, сила противоположная силе P — приложена к воздушному шарику (рис. 6, сила P_1); сила, противоположная силе Q — действует на руку (Q_1); сила, противоположная силе R—приложена в центре земного шара (сила R_1 рис. 6), потому что грузик не только притягивается Землей, но и сам ее притягивает.

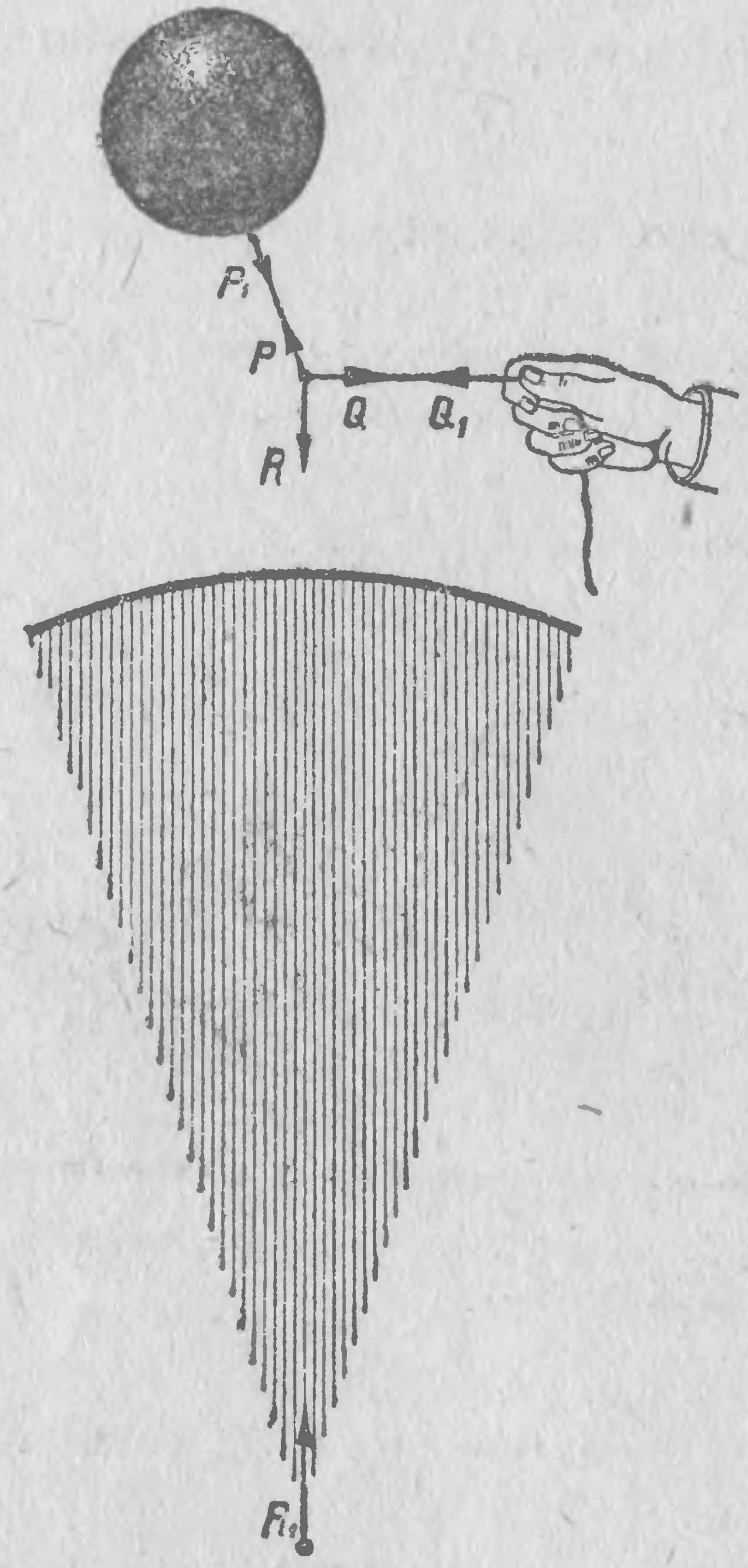


Рис. 6. Ответ на вопрос предыдущего рисунка: P_1, Q_1, R_1 — силы противодействующие.

Еще одно существенное замечание. Когда мы спрашиваем о величине натяжения веревки, концы которой растягиваются силами в 1 *кг*, мы спрашиваем в сущности о цене 10-копеечной почтовой марки. Ответ содержится в самом вопросе: веревка натянута с силой 1 *кг*. Сказать «веревка растягивается двумя силами в 1 *кг*» или «веревка подвержена натяжению в 1 *кг*» — значит выразить буквально одну и ту же мысль.

Ведь другого натяжения в 1 *кг* быть не может, кроме такого, которое состоит из двух сил, направленных в противоположные стороны. Забывая об этом, впадают нередко в грубые ошибки, примеры которых мы сейчас приведем.

ЗАДАЧА О ДВУХ ЛОШАДЯХ

Две лошади растягивают пружинный безмен с силою 100 *кг* каждая. Что показывает стрелка безмена?

Решение

Многие отвечают: $100 + 100 = 200$ *кг*. Ответ неверен. Силы по 100 *кг*, с какими тянут лошади, вызывают,

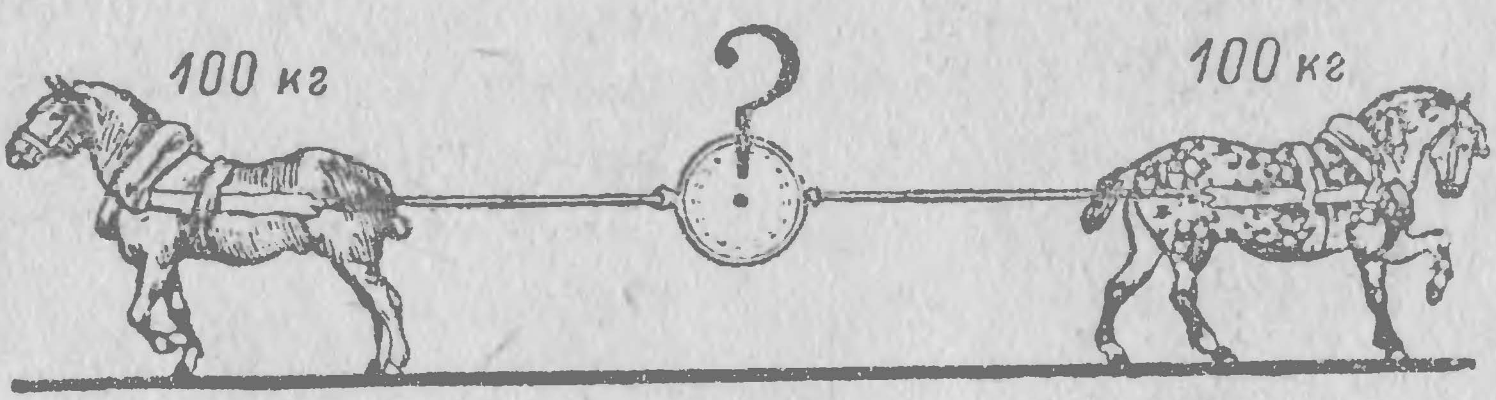


Рис. 7. Каждая лошадь тянет с силою 100 *кг*. Сколько показывает пружинный безмен?

как мы только что видели, натяжение не в 200, а только в 100 *кг*.

Поэтому, между прочим, когда магдебургские полушария растягивались 8 лошадьми в одну сторону и 8 в противоположную, то не следует думать, что они растягивались силой 16 лошадей. При отсутствии противодействующих 8 лошадей, остальные 8 не произвели бы на полушария ровно никакого действия. Одну восьмерку лошадей можно было бы заменить просто стеной.

ЗАДАЧА О ДВУХ ЛОДКАХ

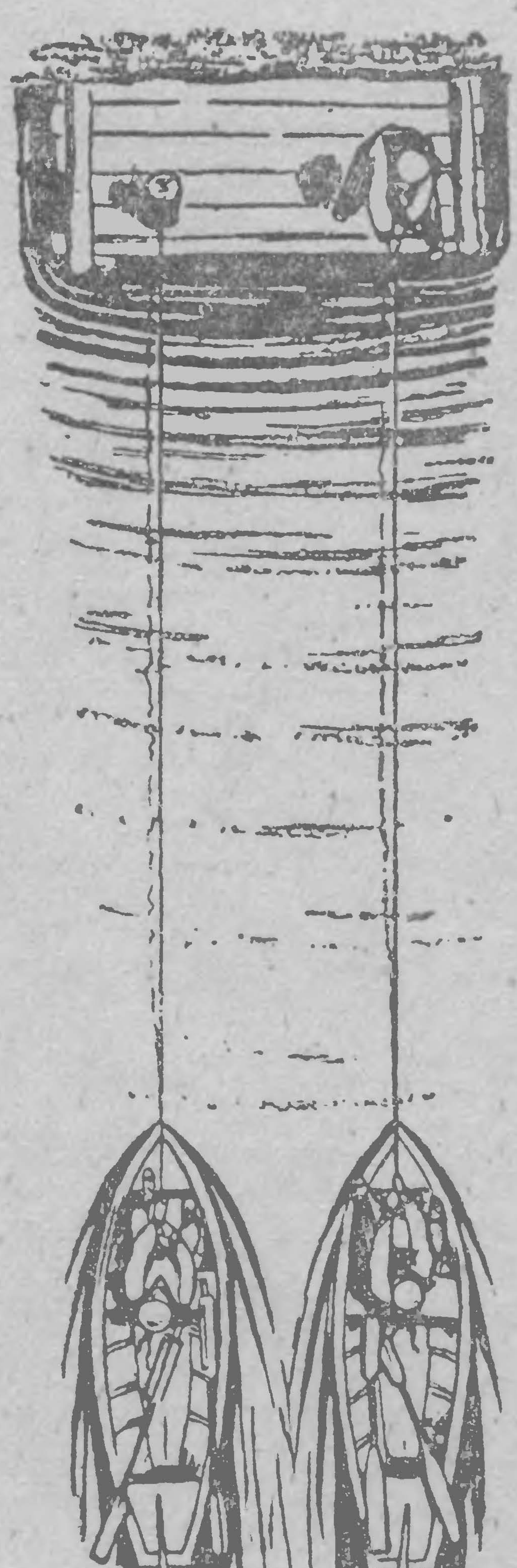


Рис. 8. Которая из лодок причалит раньше?

К пристани на озере приближаются две одинаковых лодки. Оба лодочника подтягиваются с помощью веревки. Противоположный конец веревки первой лодки привязан к тумбе на пристани; противоположный же конец веревки второй лодки находится в руках матроса на пристани, который также тянет веревку к себе.

Все трое прилагают одинаковые усилия.

Какая лодка причалит раньше?

Решение

На первый взгляд может показаться, что причалит раньше та лодка, которую тянут двое: двойная сила порождает большую скорость.

Но верно ли, что на эту лодку действует двойная сила? Если и лодочник и матрос оба тянут к себе веревку, то натяжение веревки равно силе только одного из них — иначе говоря, оно таково же, как и для первой лодки. Обе лодки подтягиваются с равною силою и причалят одновременно[1].

ЗАГАДКА ПЕШЕХОДА И ПАРОВОЗА

Бывают случаи, — на практике нередкие, — когда как действующая, так и противодействующая силы, приложены в разных местах одного и того же тела. Мускульное напряжение или давление пара в цилиндре паровоза представляют примеры таких сил, называемых «внутренними». Особенность их та, что они могут изменять взаимное расположение частей тела, насколько это допускает связь частей, но никак не могут сообщить всем частям тела одно общее движение. При выстреле из ружья пороховые газы, действуя в одну сторону, выбрасывают пулю вперед. В то же время давление пороховых газов, направленное в противоположную сторону, сообщает ружью движение назад. Двигать вперед и пулю и ружье давление пороховых газов, как сила внутренняя, не может.

Но если внутренние силы неспособны перемещать все тело, то как же движется пешеход? Как движется паровоз? Сказать, что пешеходу помогает трение ног о землю,

---

[1] С таким моим решением не согласился один из наших известных физиков, высказавший в письме ко мне соображение, которое, возможно, возникло в уме и других читателей:

«Чтобы лодки причалили, — писал он, — надо, чтобы люди выбирали веревки. А двое, конечно, за то же время выберут веревки больше, и потому правая лодка причалит скорее».

Этот простой довод, кажущийся на первый взгляд бесспорным, на самом деле ошибочен. Чтобы сообщить лодке двойную скорость (иначе лодка не пристанет вдвое скорее), каждый из двоих тянущих должен тянуть лодку с удвоенной силой. Только при таком условии удастся им выбрать вдвое больше веревки, чем одинокому (в противном случае — откуда возьмется у них для этого свободная веревка?). Но в условии задачи оговорено, что «все трое прилагают одинаковые усилия». Сколько бы двое ни старались, им не выбрать веревки больше, чем одинокому, раз сила натяжения веревок одинакова.

а паровозу трение колес о рельсы, — не значит еще разрешить загадку. Трение, конечно, совершенно необходимо для движения пешехода и паровоза: известно, что нельзя ходить по очень скользкому льду и что паровоз на скользких рельсах вращает колеса, не двигаясь с места. Но известно и то, что трение — сила пассивная (стр. 25), неспособная сама по себе порождать движение.

Выходит, что силы, участвующие в движении пешехода и паровоза, не могут заставить их двигаться. Каким же образом движение все-таки происходит?

Загадка разрешается довольно просто. Две внутренних силы, действуя одновременно, не могут сообщить телу движения, так как действие одной силы уравновешивается действием другой. Но что будет, если некоторая третья сила уравновесит или ослабит действие одной из двух внутренних сил? Тогда ничто не помешает другой внутренней силе двигать тело. Трение и есть та третья сила, которая ослабляет действие одной из внутренних сил и тем дает другой силе возможность двигать тело.

Для большей ясности обозначим обе внутренние силы буквами F_1 и F_2, а силу трения — буквой F_3. Если величина и направление силы F_3 таковы, что она достаточно ослабляет действие силы F_2, то сила F_1 сможет привести тело в движение. Короче, движение пешехода и паровоза осуществляется потому, что из трех действующих на тело сил

$$F_1, F_2, F_3$$

силы — F_2 и F_3 полностью или частью уравновешиваются, и тогда сила F_1 становится действующей. Инженеры, описывая движение паровоза, предпочитают говорить, не вполне последовательно, что уравновешиваются силы F_1 и F_2, а движет паровоз сила трения F_3. Практически это, впрочем, безразлично, поскольку для движения паровоза необходимо участие и силы пара и силы трения.

ЧТО ЗНАЧИТ „ПРЕОДОЛЕТЬ ИНЕРЦИЮ"?

Закончим главу рассмотрением еще одного вопроса, также зачастую порождающего превратные представления. Приходится нередко читать и слышать, что для приведения покоящегося тела в движение надо прежде всего «преодолеть инерцию» этого тела. Мы знаем, однако, что свободное тело нисколько не сопротивляется стремлению силы привести его в движение. Что же тут надо «преодолевать»?

«Преодоление инерции» — не более, как условное выражение той мысли, что каждое тело для приведения себя в движение с определенной скоростью требует определенного промежутка времени. Никакая сила, даже самая большая, не может мгновенно сообщить заданную скорость никакой массе, как бы ни была ничтожна эта масса. Мысль эта замкнута в краткой формуле

$$ft = mv,$$

о которой мы будем говорить в следующей главе, но которая, надеюсь, знакома читателю из учебника физики. Ясно, что при $t = 0$ (время равно нулю) произведение mv массы на скорость равно нулю, и, следовательно, скорость равна нулю, так как масса не может равняться нулю. Другими словами, если силе f не дать времени для проявления ее действия, она не сообщит телу никакой скорости, никакого движения. Если масса тела велика, потребуется сравнительно большой промежуток времени, чтобы сила сообщила телу заметное движение. Нам будет казаться, что тело начинает двигаться не сразу, что оно словно противится действию силы. Отсюда и сложилось ложное представление о том, что сила, прежде чем заставить тело двигаться, должна «преодолеть его инерцию», его косность (буквальный смысл слова «инерция»).

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ВАГОН

Один из читателей просит меня разъяснить вопрос, который, в связи с сейчас сказанным, возник вероятно у многих: «Почему сдвинуть железнодорожный вагон с места труднее, чем поддерживать движение вагона, уже катящегося равномерно?»

Не только труднее, прибавлю я, но и вовсе невозможно, если прилагать небольшое усилие. Чтобы поддерживать равномерное движение пустого товарного вагона по горизонтальному пути, достаточно, при хорошей смазке, усилия килограммов в 15. Между тем, такой же неподвижный вагон не удается сдвинуть с места силой меньшей 60 килограммов.

Причина не только в том, что приходится в течение первых секунд затрачивать силу на приведение вагона в движение с заданной скоростью (затрата эта сравнительно невелика); причина кроется, главным образом, в условиях смазки стоящего вагона. В начале движения смазка еще не распределена равномерно по всему подшипнику, и оттого заставить вагон двигаться тогда очень трудно. Но едва колесо сделает первый оборот, условия смазки сразу значительно улучшаются, и поддерживать дальнейшее движение становится несравненно легче.

Глава вторая

СИЛА И ДВИЖЕНИЕ

СПРАВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПО МЕХАНИКЕ

«Никакое человеческое знание не может притязать на название истинной науки, если оно не пользуется математическими доказательствами», — писал четыреста лет назад Леонардо да-Винчи. Это было верно уже в младенческие годы науки; еще правильнее такое утверждение для наших дней. В настоящей книге нам не раз придется обращаться к формулам из механики. Для читателей, хотя и проходивших механику, но забывших эти соотношения, дана здесь небольшая табличка-справочник, помогающая восстановить в памяти важнейшие формулы. Она составлена по образцу пифагоровой таблицы умножения: на пересечении двух граф отыскивается то, что получается от умножения величин, написанных по краям. (Обоснование этих формул читатель найдет в учебниках механики.)

Покажем на нескольких примерах, как пользоваться табличкой.

Умножая скорость v равномерного движения на время t, получаем путь S (формула $S = vt$).

Умножая силу f на путь S, получаем работу A, которая в то же время равна и полупроизведению массы m на квадрат скорости v: $A = fS = \frac{mv^2}{2}$ [1].

	Скорость v	Время t	Масса m	Ускорение a	Сила f
Путь S	—	—	—	$\frac{v^2}{2}$ (равноперем. движ.)	Работа $A = \frac{mv^2}{2}$
Скорость v	$2aS$ (равноперем. движ.)	Путь S (равномерн. движ.)	Импульс ft	—	Мощность $W = \frac{A}{t}$
Время t	Путь S (равномерн. движ.)	—	—	Скорость v (равноперем. движ.)	Количество движения mv
Масса m	Импульс ft	—	—	Сила f	—

[1] Формула $A = fS$ верна лишь в том случае, когда направление силы совпадает с направлением пути. Вообще же имеет место более сложная формула $A = fS \cos \alpha$, в которой α обозначает угол между направлениями силы и пути.

Также и формула $A = \frac{mv^2}{2}$ верна только в простейшем случае, когда начальная скорость тела равна нулю; если же начальная скорость равна v_0, а конечная скорость v, то работа, которую нужно затратить, чтобы вызвать такое изменение скорости, выражается формулой $A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$.

Подобно тому, как помощью таблицы умножения можно узнавать результаты деления, так и из нашей таблички можно извлечь, например, следующие соотношения:

Скорость v равнопеременного движения, деленная на время t, равна ускорению a $\left(\text{формула } a=\frac{v}{t}\right)$.

Сила f, деленная на массу m, равна ускорению a; деленная же на ускорение a, равна массе m:

$$a=\frac{f}{m} \text{ и } m=\frac{f}{a}.$$

Пусть для решения механической задачи вам потребовалось вычислить ускорение. Вы составляете по табличке все формулы, содержащие ускорение, прежде всего формулы:

$$aS=\frac{v^2}{2},$$
$$v=at$$
$$f=ma,$$

а затем и формулу

$$t^2=\frac{2S}{a}, \text{ т. е. } S=\frac{at^2}{2}.$$

Среди них ищете ту, которая отвечает условиям задачи.

Если пожелаете иметь все уравнения, помощью которых может быть определена сила, табличка предложит вам на выбор:

$fS=A$ (работа)
$fv=W$ (мощность)
$ft=mv$ (количество движения)
$f=ma$.

Не надо упускать из виду, что вес (P) есть тоже сила, поэтому наряду с формулой $f=ma$ в нашем распоряжении имеется и формула $P=mg$, где g — ускорение силы тяжести близ земной поверхности. Точно так же из формулы $fS=A$ следует, что $Ph=A$ для тела весом P, поднятого на высоту h.

Пустые клетки таблицы показывают, что произведения соответствующих величин не имеют в механике никакого смысла.

Еще важное замечание. Формулы механики полезны только в руках того вычислителя, который твердо знает, в каких мерах надо выразить входящие в них величины. Если, вычисляя работу по формуле $A = fS$, вы выразите силу f в килограммах, а путь S — в сантиметрах, то получите величину работы в редко употребительных единицах — в килограммо-сантиметрах и, конечно, легко можете запутаться. Чтобы получился надлежащий результат, сила должна быть выражена в килограммах, а путь в метрах; тогда работа получится в килограммо-метрах. Но вы можете выразить силу и в динах, а путь в сантиметрах, тогда результат покажет число эргов работы (дина — сила, равная 1/980 *г*, т. е. приблизительно 1 *мг*), — дино-сантиметров.

Точно так же равенство $f = ma$ даст силу в динах только тогда, когда масса выражена в граммах, а ускорение в сантиметрах в секунду за секунду.

Уменью выбирать единицы мер и безошибочно определять, в каких мерах получился результат, нельзя научиться в четверть часа. Кто этим уменьем еще не обладает, тому следует во всех случаях пользоваться мерами системы «сантиметр-грамм-секунда» (CGS), а полученный результат, если нужно, переводить в другие меры.

Эти практические мелочи очень существенны; незнание их зачастую приводит к самым нелепым ошибкам.

ОТДАЧА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

В качестве примера применения нашей таблицы рассмотрим «отдачу» ружья. Пороховые газы, выбрасывающие своим напором пулю в одну сторону, отбрасывают в то же время и ружье в обратную сторону, порождая всем известную «отдачу». С какой скоростью движется отдающее ружье? Вспомним закон равенства действия и противодействия. По этому закону давление пороховых газов на ружье должно быть равно давлению пороховых газов на пулю, выбрасывающему пулю. При этом обе силы действуют одинаковое время. Заглянув в таблицу, находим, что произведение силы (f) на время (t) равно «количеству движения» mv, т. е. произведению массы m на ее скорость v:

$$ft = mv.$$

Так как ft для пули и для ружья одинаково, то должны быть одинаковы и количества движения. Если m — масса пули, v — ее скорость, M — масса ружья, w — его скорость, то согласно сейчас сказанному

$$mv = Mw,$$

откуда

$$\frac{w}{v} = \frac{m}{M}.$$

Подставим в эту пропорцию числовые значения ее членов. Масса пули военной винтовки — 9,6 *г*, скорость ее при

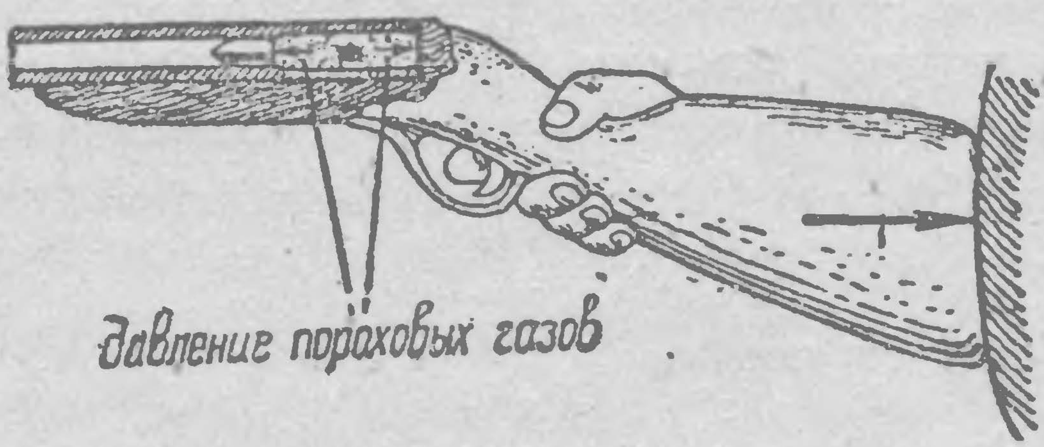


Рис. 9. Почему ружье при выстреле отдает?

вылете — 800 *м/сек;* масса винтовки — 4500 *г*. Значит,

$$\frac{w}{880} = \frac{9{,}6}{4500}.$$

Следовательно, скорость ружья $w = 1{,}9$ *м*. Нетрудно вычислить, что отдающее ружье несет с собою в 470 раз меньшую «живую силу» $\left(\frac{mw^2}{2}\right)$, нежели пуля; это значит, что разрушительная энергия ружья при отдаче в 470 раз меньше, нежели пули, хотя — заметим это! — количество движения для обоих тел одинаково. Неумелого стрелка отдача может все же опрокинуть и даже поранить.

Для нашей полевой скорострельной пушки, весящей 2000 *кг* и выбрасывающей 6-килограммовые снаряды со скоростью 600 *м/сек*, скорость отдачи примерно такая же, как и у винтовки — 1,9 *м*. Но при значительной массе орудия энергия этого движения в 450 раз больше, чем для винтовки, и почти равна энергии ружейной пули в момент ее вылета. Старинные пушки откатывались отдачей с места назад. В современных орудиях скользит назад только ствол, лафет же остается неподвижным, удерживаемый упором (сошником) на конце хобота. Морские орудия (не вся орудийная установка) при выстреле откатываются назад, но, благодаря особому приспособлению, сами после отката возвращаются на прежнее место.

Читатель заметил, вероятно, что в наших примерах тела, наделенные равными количествами движения, обладают далеко неодинаковой кинетической энергией. В этом, разумеется, нет ничего неожиданного: из равенства

$$mv = Mw$$

вовсе не следует, что

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{Mw^2}{2}.$$

Второе равенство верно лишь в том случае, когда $v = w$ (в этом легко убедиться, разделив второе равенство на первое). Между тем среди людей, не изучавших механику систематически, весьма распространено неправильное убеждение, будто равенство количеств движения (а значит, и равенство импульсов) обусловливает собой равенство кинетической энергии. Многие изобретатели-самоучки, как я заметил, исходят из того, что равным импульсам соответствуют равные количества работы. Это ведет, конечно, к плачевным неудачам и лишний раз доказывает необходимость для изобретателя хорошо усвоить основы теоретической механики.

ЗНАНИЕ ОБИХОДНОЕ И НАУЧНОЕ

При изучении механики поражает то, что во многих весьма простых случаях наука эта резко расходится с обиходными представлениями. Вот показательный пример. Как должно двигаться тело, на которое неизменно действует одна и та же сила? «Здравый смысл» подсказывает, что такое тело должно двигаться все время с одинаковой скоростью, т. е. равномерно. И наоборот, если тело движется равномерно, то это в обиходе считается признаком того, что на тело действует все время одинаковая сила. Движение телеги, паровоза и т. п. как будто подтверждает это.

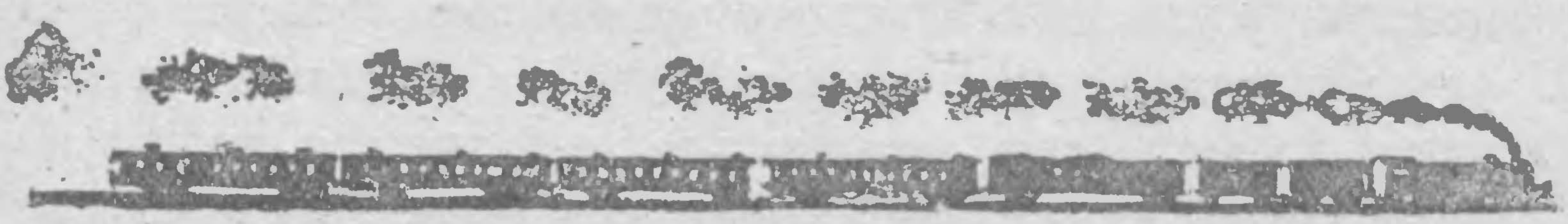


Рис. 10.

Механика говорит, однако, совершенно другое. Она учит, что постоянная сила порождает движение не равномерное, а ускоренное, — так как к скорости, ранее накопленной, сила непрерывно добавляет новую скорость. При равномерном же движении тело вовсе не находится под действием силы, — иначе оно двигалось бы неравномерно (см. стр. 25).

Неужели же обиходные наблюдения так грубо ошибочны?

Нет, они не вполне ошибочны, но относятся к весьма ограниченному кругу явлений. Обиходные наблюдения делаются над телами, перемещающимися в условиях трения и сопротивления среды. Законы же механики имеют в виду тела, движущиеся свободно. Чтобы тело, движущееся с трением, обладало постоянной скоростью, к нему действительно надо приложить постоянную силу. Но сила тратится здесь не на то, чтобы двигать тело, а лишь на то, чтобы преодолевать трение, т. е. создать для тела условия свободного движения. Вполне возможны поэтому случаи, когда тело, движущееся с трением равномерно, находится под действием постоянной силы.

Мы видим, в чем грешит обиходная механика: ее утверждения почерпнуты из недостаточного материала. Научные обобщения имеют более широкую базу. Законы научной механики выведены из движения не только телег и паровозов, но также планет и комет. Чтобы делать правильные обобщения, надо расширить поле наблюдений и очистить факты от случайных обстоятельств. Только так добытое знание раскрывает глубокие корни явлений и может быть плодотворно применено иа практике.

В дальнейшем мы рассмотрим ряд явлений, где отчетливо выступает связь между величиной силы, двигающей свободное тело, и величиной приобретаемого им ускорения, — связь, которая устанавливается уже упоминавшимся вторым законом Ньютона. Это важное соотношение, к сожалению, смутно усваивается при школьном прохождении механики. Примеры взяты в обстановке фантастической, но сущность явления выступает от этого еще отчетливее.

ПУШКА НА ЛУНЕ

Задача

Артиллерийское орудие сообщает снаряду на Земле начальную скорость 900 *м/сек*. Перенесите его мысленно на Луну, где все тела становятся в шесть раз легче. С какой скоростью снаряд покинет там это орудие? (Различие, обусловленное отсутствием иа Луне атмосферы, оставим без внимания.)

Решение

На вопрос этой задачи часто отвечают, что так как сила взрыва на Земле и на Луне одинакова, а действовать на Луне приходится ей на вшестеро более легкий снаряд, то сообщенная скорость должна быть там в шесть раз больше, чем на Земле: $900 \times 6 = 5400$ *м/сек*. Снаряд вылетит на Луне со скоростью 5,4 *км/сек*.

Подобный ответ при кажущемся его правдоподобии совершенно неверен.

Между силой, ускорением и весом вовсе не существует той связи, из какой исходит приведенное рассуждение. Формула механики, являющаяся математическим выражением второго закона Ньютона, связывает силу и ускорение с массой, а не с весом: $f = ma$. Но масса снаряда нисколько на Луне не изменилась: она там та же, что и на Земле; значит, и ускорение, сообщаемое снаряду силой взрыва, должно быть на Луне такое же, как и на Земле: а при одинаковых ускорениях и времени — одинаковы и скорости (согласно формуле $v = at$).

Итак, пушка на Луне выбросила бы снаряд точно с такой же начальной скоростью, как и на Земле. Другое дело, как далеко или как высоко залетел бы на Луне этот снаряд. В этом случае ослабление тяжести имеет уже существенное значение.

Например, высота отвесного подъема снаряда, покинувшего на Луне пушку со скоростью 900 *м/сек*, определится из формулы

$$aS = \frac{v^2}{2},$$

которую мы находим в справочной табличке (стр. 36). Так как ускорение силы тяжести на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле, т. е. $a = \frac{g}{6}$, то формула получает вид:

$$\frac{gS}{6} = \frac{v^2}{2}.$$

Отсюда пройденный снарядом отвесный путь

$$S = 6 \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

На Земле же (при отсутствии атмосферы):

$$S = \frac{v^2}{2g}.$$

Значит, на Луне пушка закинула бы ядро в шесть раз выше, чем на Земле (сопротивление воздуха мы не принимали во внимание), несмотря на то, что начальная скорость снаряда в обоих случаях одинакова.

НАГАН НА ДНЕ ОКЕАНА

Для этой задачи взята также необычная обстановка — дно океана. Глубочайшее место океана, какое удалось промерить, находится близ Антильских островов: 11000 *м*.

Вообразите, что на этой глубине очутился наган и что заряд его не промок. Курок спущен, порох воспламенился. Вылетит ли пуля?

Вот сведения о нагане, необходимые для решения задачи: длина ствола 22 *см*; скорость пули при выходе из дула — 270 *м/сек*; калибр (диаметр канала) — 7 *мм*; вес пули — 7 *г*.

Итак, выстрелит ли наган на дне океана?

Решение

Задача сводится к решению вопроса: какое давление на пулю больше — пороховых газов изнутри или воды океана снаружи? Последнее рассчитать несложно: каждые 10 *м* водяного столба давят с силой одной атмосферы, т. е. 1 *кг* на 1 *кв. см*. Следовательно, 11000 *м* водяного столба окажут давление в 1100 атмосфер, или больше тонны на 1 *кв. см*.

Теперь определим давление пороховых газов. Прежде всего вычислим силу, движущую пулю. Для этого найдем среднее ускорение движения пули в стволе (принимая это движение за равномерно-ускоренное). Отыскиваем в табличке соотношение

$$v^2 = 2aS,$$

где v — скорость пули у дульного обреза; a — искомое ускорение; S — длина пути, пройденного пулей под непосредственным давлением газов, иными словами — длина ствола. Подставив $v = 270$ *м* $= 27\,000$ *см* в сек., $S = 22$ *см*, имеем

$$27\,000^2 = 2a \times 22,$$

ускорение $a = 16\,500\,000$ *см/сек²* $= 165$ *км* в сек. за сек.

Огромная величина ускорения (среднего) — 165 *км* в сек. за сек. — не должна нас удивлять: ведь пуля проходит путь по каналу нагана в ничтожный промежуток вре-

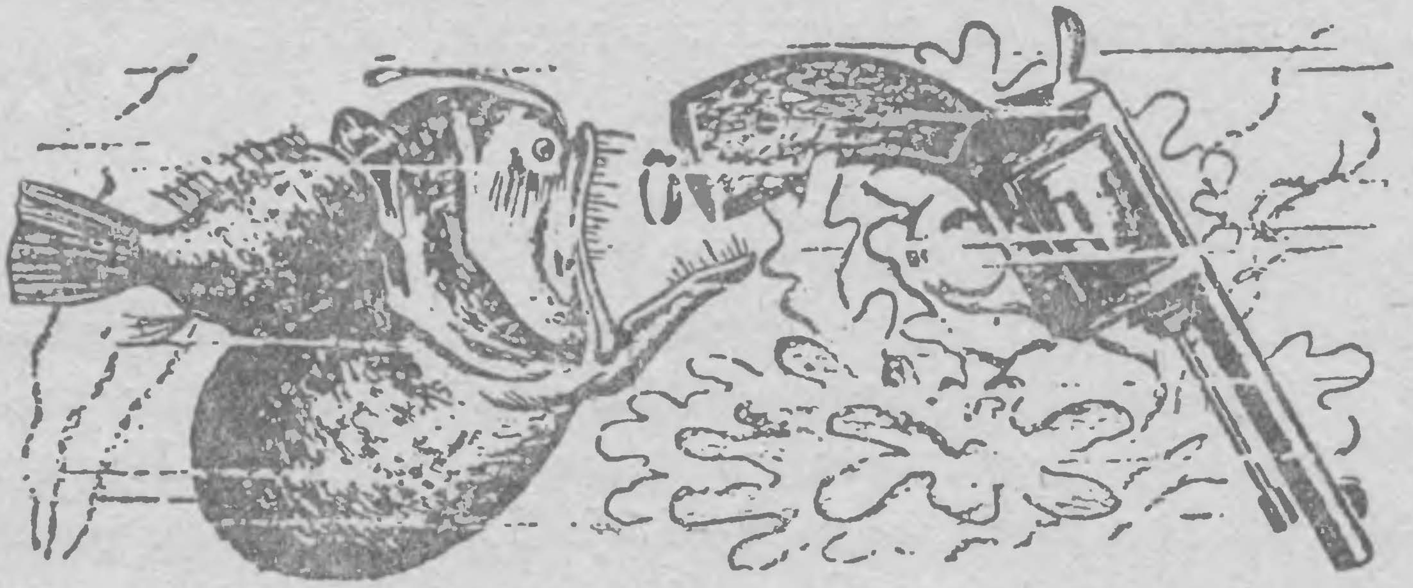


Рис. 11. Выстрелит ли наган на дне океана?

мени, который тоже поучительно вычислить. Расчет выполняем по формуле $v = at$:

$$27\,000 = 16\,500\,000\ t,$$

откуда время

$$t = \frac{27}{16\,500} = \text{около } \frac{1}{600} \text{ сек.}$$

Мы видим, что за 600-ю долю секунды скорость пули должна возрасти от нуля до 270 *м*. Ясно, что за целую секунду прибавка скорости, так стремительно нарастающей, должна быть огромна.

Но вернемся к расчету давления. Узнав величину ускорения пули (масса которой 7 *г*), мы легко вычислим действующую на нее силу, применив формулу $f = ma$

$$7 \times 16\,500\,000 = 115\,500\,000 \text{ дин.}$$

В килограмме круглым счетом миллион дин (дина — около миллиграмма); значит, на пулю действует сила в 115 *кг*. Чтобы вычислить давление в килограммах на 1 *кв. см*, надо знать, по какой площади эта сила распределяется Площадь равна поперечному сечению канала револьвера (диаметр канала 7 *мм* = 0,7 *см*):

$$\frac{1}{4} \times 3{,}14 \times 0{,}7^2 = 0{,}38 \text{ кв. см.}$$

Значит, на 1 *кв. см* приходится давление в

$$115 : 0{,}38 = \text{около } 300 \text{ кг.}$$

Итак, пуля в момент выстрела выталкивается давлением в 300 атмосфер против давления океанских вод, превышающего тысячу атмосфер. Ясно, что пуля не двинется с места. Порох вспыхнет, но не вытолкнет пули. Пуля нагана, пробивающая на воздухе (с 35 шагов) четыре-пять дюймовых досок кряду, здесь бессильна «пробить» воду.

СДВИНУТЬ ЗЕМНОЙ ШАР

Даже среди людей, изучавших механику, распространено убеждение, что малой силой нельзя сдвинуть свободное тело, если оно обладает весьма большой массой. Это одно из заблуждений «здравого смысла». Механика утверждает совершенно иное: всякая сила, даже самая незначительная, должна сообщить движение каждому телу, даже чудовищно грузному, если тело это свободно. Мы не раз пользовались уже формулой, в которой выражена эта мысль:

$$f = ma, \text{ откуда } a = \frac{f}{m}.$$

Последнее выражение говорит нам, что ускорение может быть равно нулю только в том случае, когда сила f

равна нулю. Поэтому всякая сила должна заставить двигаться любое свободное тело.

В окружающих нас условиях мы не всегда видим подтверждение этого закона. Причина — трение, вообще сопротивление движению. Другими словами, причина та, что перед нами очень редко бывает тело свободное: движение почти всех наблюдаемых нами тел не свободно. Чтобы в условиях трения заставить тело двигаться, необходимо приложить силу, которая больше трения. Дубовый шкаф на сухом дубовом полу только в том случае придет в движение под напором наших рук, если мы разовьем силу не меньше $^1/_3$ веса шкафа, — потому что сила трения дуба по дубу (насухо) составляет 34% веса тела. Но если бы никакого трения не было, то даже ребенок заставил бы двигаться тяжелый шкаф прикосновением пальца.

К тем немногим телам природы, которые совершенно свободны, т. е. движутся, не испытывая ни трения, ни сопротивления среды, принадлежат небесные тела — Солнце, Луна, планеты, в их числе и наша Земля. Значит ли это, что человек мог бы сдвинуть с места земной шар силой своих мускулов? Безусловно так: напирая на земной шар, вы приведете его в движение!

Но вот вопрос: какова окажется скорость этого движения? Мы знаем, что ускорение, приобретаемое телом под действием данной силы, тем меньше, чем больше масса тела. Если деревянному крокетному шару мы силой своих рук можем сообщить ускорение в несколько десятков метров в секунду за секунду, то земной шар, масса которого неизмеримо больше, получит от такой же силы неизмеримо меньшее ускорение. Мы говорим: «неизмеримо больше», «неизмеримо меньше», конечно, не в буквальном смысле. Измерить массу земного шара возможно [1], а следовательно,

[1] См. об этом в моей «Занимательной астрономии» статью: «Как взвесили Землю».

возможно определить и его ускорение при заданных условиях. Сделаем это.

Пусть сила, с какой человек напирает на земной шар, равна 10 кг, т. е. около 10 000 000 дин. Мы рискуем запутаться в выкладках, если не прибегнем здесь к сокращенному обозначению больших чисел: $10\,000\,000 = 10^7$. Масса земного шара равна 6×10^{27} г. Поэтому величина искомого ускорения

$$a = \frac{f}{m} = \frac{10^7}{6 \times 10^{27}} = \frac{1}{6 \times 10^{20}} \text{ см/сек}^2.$$

Такова величина ускорения, приобретаемого в этом случае земным шаром. На сколько же сдвинется планета в столь медленно ускоряющемся движении? Это зависит от продолжительности движения. И без расчета ясно, что за какой-нибудь час или сутки перемещение будет слишком ничтожно. Возьмем крупный интервал — год, т. е. круглым счетом 32 миллиона секунд (32×10^6). Путь S, проходимый в t секунд при ускорении a, равен (см. справочную табличку стр. 36).

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

В данном случае

$$S = \frac{1}{6 \times 10^{20}} \times \frac{(32 \times 10^6)^2}{2} = \frac{1}{12 \times 10^5} \text{ см}.$$

Перемещение равно, примерно, миллионной доле сантиметра. Такого перемещения нельзя усмотреть в самый сильный микроскоп. Возьмем еще бо́льший промежуток времени: пусть человек напирает на земной шар всю жизнь, скажем 70 лет. Тогда величина перемещения увеличится в 70^2, т. е. круглым счетом в 5000 раз, и станет равной

$$\frac{5 \times 10^3}{12 \times 10^5} \text{ см} = 0{,}04 \text{ мм}.$$

Это — приблизительно толщина человеческого волоса.

Результат поразительный: силой своих мышц человек может в течение жизни сдвинуть земной шар на толщину волоса! Как хотите, это все же значительное действие для такого пигмея, как человек.

Самое удивительное то, что расчет наш ничуть не фантастичен. Мы действительно сдвигаем земной шар силой наших мускулов! Так, например, подпрыгивая мы надавливаем ногами на Землю и заставляем ее подаваться — пусть на ничтожную величину — под действием этой силы. Мы совершаем подобные подвиги на каждом шагу — буквально на каждом шагу, потому что при ходьбе неизбежно отталкиваем ногой нашу планету. Ежесекундно заставляем мы земной шар делать сверхмикроскопические перемещения, прибавляя их к тем астрономическим движениям, которыми он обладает [1].

ЛОЖНЫЙ ПУТЬ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВА

В поисках новых технических возможностей изобретатель должен неизменно держать свою мысль под контролем строгих законов механики, если не хочет вступить на путь бесплодного фантазерства. Не следует думать, что единственный общий принцип, которого не должна нарушать изобретательская мысль, есть закон сохранения энергии. Существует и другое важное положение, пренебрежение которым нередко заводит изобретателей в тупик и заставляет их бесплодно растрачивать свои силы. Это — закон движения центра тяжести. Рассматривая предлагаемые изобретателями проекты новых летательных аппаратов, я не раз убеждался, что закон этот мало известен широким кругам.

Упомянутый закон утверждает, что движение центра тяжести тела (или системы тел) не может быть изменено действием одних лишь внутренних сил. Если летящая бомба разрывается, то, пока образовавшиеся осколки не

[1] Надо, впрочем, иметь в виду, что наши усилия не целиком расходуются на сообщение Земле движения: часть силы тратится на изменение ее формы.

достигли земли, общий центр их тяжести продолжает двигаться по тому же пути, по какому двигался центр тяжести целой бомбы. В частном случае, если центр тяжести тела был первоначально в покое (т. е. если тело было неподвижно), то никакие внутренние силы не могут переместить центра тяжести.

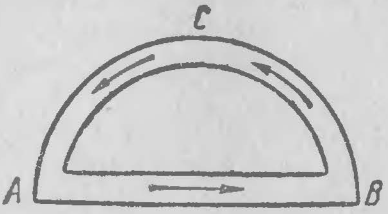


Рис. 12 Проект летательного аппарата нового типа.

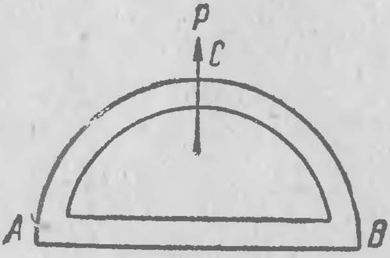


Рис. 13. Сила P должна увлекать аппарат вверх.

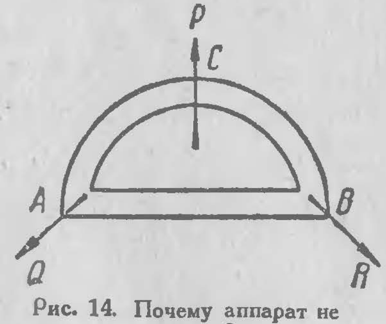


Рис. 14. Почему аппарат не взлетает?

К какого рода заблуждениям приводит изобретателей пренебрежение рассматриваемым законом, показывает следующий поучительный пример — проект летательной машины совершенно нового типа. Представим себе,—говорит изобретатель, — замкнутую трубу (черт. 12), состоящую из двух частей: горизонтальной прямой AB и дугообразной части ACB — над ней. В трубах имеется жидкость, которая непрерывно течет в одном направлении (течение поддерживается вращением винтов, размещенных в трубах). Течение жидкости в дугообразной части ACB трубы сопровождается центробежным давлением на наружную стенку. Получается некоторое усилие P (черт. 13), направленное вверх, — усилие, которому никакая другая сила не противодействует, так как движение жидкости по прямому пути AB не сопровождается центробежным давлением. Изобретатель делает отсюда тот вывод, что, при достаточной скорости течения, сила P должна увлечь весь аппарат вверх.

Верна ли мысль изобретателя? Даже не входя в подробности механизма, можно заранее утверждать, что аппарат не сдвинется с места. В самом деле, так как действующие здесь силы — внутренние, то переместить центр тяжести всей системы (т. е. трубы вместе с наполняющей ее водой и механизмом, поддерживающим течение) они не могут. Машина, следовательно, не может получить общего поступательного движения. В рассуждении изобретателя кроется какая-то ошибка, какое-то существенное упущение.

Нетрудно указать, в чем именно заключается ошибка. Автор проекта не принял во внимание, что центробежное давление должно возникать не только в кривой части ACB пути жидкости, но и в точках A и B поворота течения (рис. 14). Хотя кривой путь там и не длинен, зато повороты очень круты (радиус кривизны мал). А известно, что чем круче поворот (чем меньше радиус кривизны), тем центробежный эффект сильнее. Вследствие этого на поворотах должны действовать еще две силы Q и R, направленные наружу; равнодействующая этих сил направлена вниз и уравновешивает силу P. Изобретатель проглядел эти силы. Но и не зная о них, он мог бы понять непригодность своего проекта, если бы ему был известен закон движения центра тяжести.

Правильно писал еще четыре столетия назад великий Леонардо да-Винчи, что законы механики «держат в узде инженеров и изобретателей для того, чтобы они не обещали себе или другим невозможные вещи».

ГДЕ ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ ЛЕТЯЩЕЙ РАКЕТЫ?

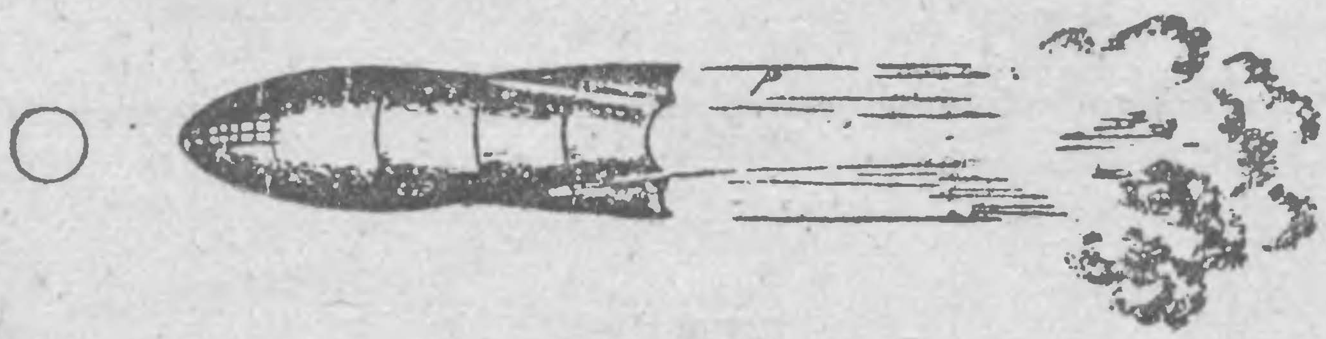
Может показаться, что молодое и многообещающее детище новейшей техники — ракетный двигатель — нарушает закон движения центра тяжести. Звездоплаватели хотят заставить ракету долететь до Луны — долететь действием одних только внутренних сил. Но ведь ясно, что ракета унесет с собой на Луну свой центр тяжести. Что же станется в таком случае с нашим законом? Центр тяжести ракеты до ее пуска был на Земле, теперь он очутился на Луне. Более явного нарушения закона и быть не может!

Что можно возразить против такого довода? То, что он основан на недоразумении. Если бы газы, вытекающие из ракеты, не встречали земной поверхности, было бы ясно, что ракета вовсе не уносит с собой на Луну свой центр тяжести. Летит на Луну только часть ракеты: остальная же часть — продукты горения — движется в противоположном направлении; поэтому центр тяжести всей системы там, где он был до старта ракеты.

Теперь примем во внимание то обстоятельство, что вытекающие газы движутся не беспрепятственно, а ударяются о Землю. Тем самым в систему ракеты включается весь земной шар, и речь должна итти о сохранении центра тяжести огромной системы Земля-ракета. Вследствие удара газовой струи о Землю (или об ее атмосферу) наша планета несколько смещается, центр тяжести ее отодвигается в сторону, противоположную движению ракеты. Масса земного шара настолько велика по сравнению с массой ракеты, что самого ничтожного, практически неуловимого его перемещения оказывается достаточно для уравновешения того смещения центра тяжести системы Земля-ракета, которое обусловлено перелетом ракеты на расстояние Луны.

Передвижение земного шара меньше расстояния до Луны во столько же раз, во сколько раз масса Земли больше массы ракеты (т. е. в сотни триллионов раз!).

Мы видим, что даже и в такой исключительной обстановке закон движения центра тяжести остается в полной силе.



Глава третья

ТЯЖЕСТЬ

СВИДЕТЕЛЬСТВА ОТВЕСА И МАЯТНИКА

Отвес и маятник — без сомнения простейшие (по крайней мере в идее) из всех приборов, какими пользуется наука. Тем удивительнее, что столь примитивными орудиями добыты поистине сказочные достижения: человеку удалось, благодаря им, проникнуть мысленно в недра Земли, узнать, что делается в десятках километров под нашими ногами. Мы вполне оценим этот подвиг науки, если вспомним, что глубочайшая буровая скважина мира не длиннее $3^1/_4$ *км*, т. е. далеко не достигает тех глубин, о которых дают нам показания, находящиеся на поверхности земли отвес и маятник.

Механический принцип, лежащий в основе такого применения отвеса, нетрудно понять. Если бы земной шар был совершенно однороден, направление отвеса в любом пункте можно было бы определить расчетом. Неравномерное распределение масс близ поверхности или в глубине Земли изменяет это теоретическое направление. Близость горы, например, заставляет отвес несколько отклоняться в ее сторону, — тем значительнее, чем ближе находится гора и чем больше ее масса. Возле обсерватории в Симеизе отвес испытывает заметное отклоняющее действие соседней стены Крымских гор; угол отклонения достигает полминуты. Еще сильнее отклоняют к себе отвес Кавказские горы: во Владикавказе на 37 сек. дуги, в Батуме — на 39 сек. Наоборот, пустота в толще Земли оказывает на отвес как бы отталкивающее действие: он оттягивается в противоположную сторону окружающими массами. (При этом величина кажущегося отталкивания равна тому притяжению, которое должна была бы производить на отвес масса вещества, если бы полость была заполнена им.) Отвес отталкивается не только полостями, но — соответственно слабее — также и скоплениями веществ, менее плотных, чем основная толща. Вот почему в Москве, вдали от всяких гор, отвес все же отклоняется к северу на 10 сек. дуги. Как видим, отвес может служить чувствительным инструментом, помогающим судить о строении земных недр.

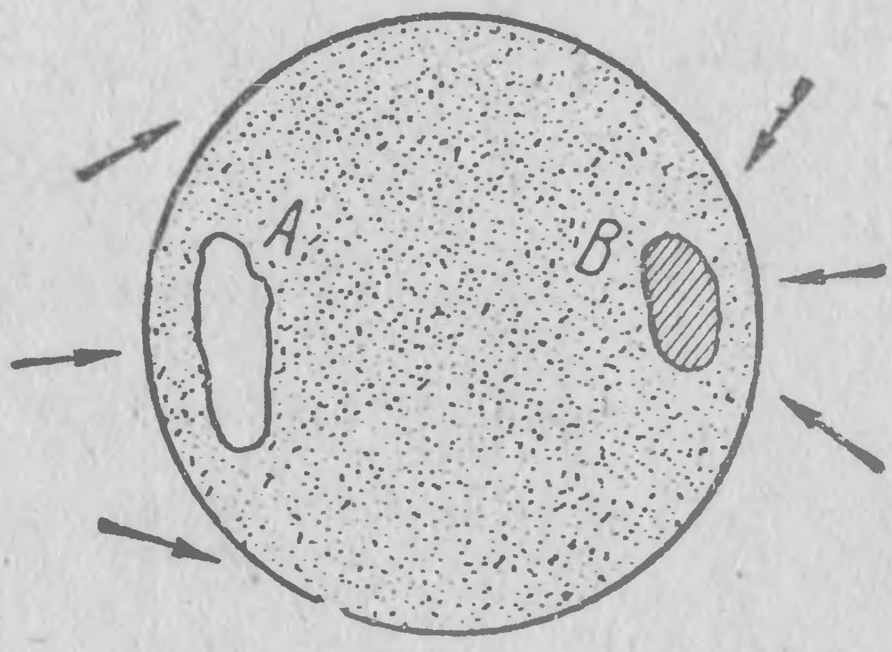


Рис. 15. Пустоты (*A*) и уплотнения (*B*) в толще земного шара отклоняют отвес (по Клоссовскому).

Еще чувствительнее в этом отношении маятник. Этот прибор обладает следующим свойством: если размах его качаний не превосходит нескольких градусов, то п р о д о л ж и т е л ь н о с т ь одного качания не зависит от величины размаха; и большие и малые качания длятся одинаково. Продолжительность качания зависит совсем от других обстоятельств: от д л и н ы маятника и о т у с к о р е н и я силы тяжести в этом месте земного шара. Формула, связывающая продолжительность t одного полного (туда и назад) качания с длиною l маятника и с ускорением g силы тяжести, такова

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

При этом если длина l маятника берется в метрах, то

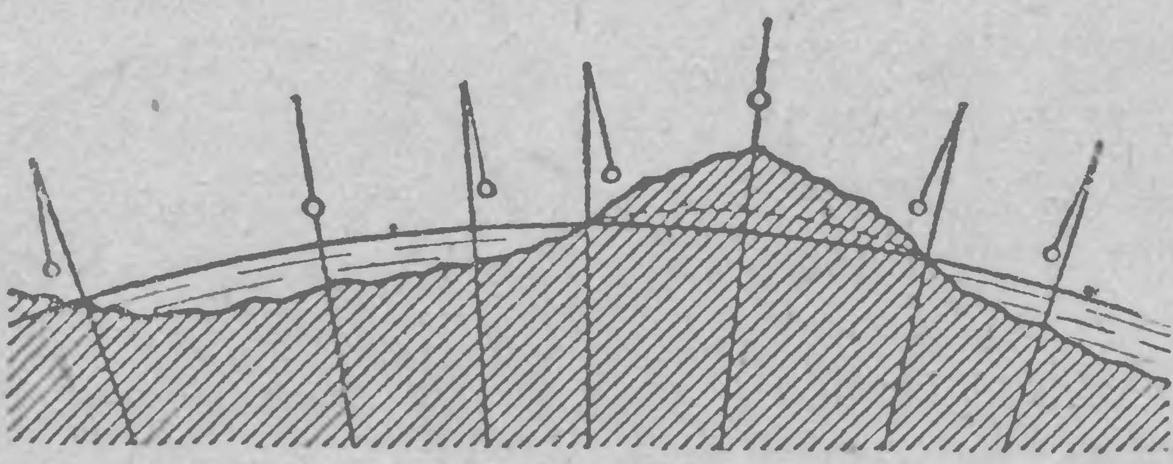


Рис. 16. Профиль земной поверхности и направления отвесов (схема—по А. В. Клоссовскому).

и ускорение g силы тяжести следует брать в метрах в сек. за сек.

Если для исследования строения толщи Земли пользоваться «секундным» маятником, т. е. делающим одно (в одну сторону) колебание в секунду, то должно быть:

$$\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 1 \text{ и } l = \frac{g}{\pi^2}.$$

Ясно, что всякое изменение силы тяжести должно отразиться на длине такого маятника: его придется либо удлинить, либо укоротить, чтобы он в точности отбивал секунды. Таким путем удается улавливать изменения силы тяжести в 0,0001 ее величины.

Не буду описывать техники выполнения подобных исследований с отвесом и маятником (она гораздо сложнее, чем можно думать). Укажу лишь на некоторые, наиболее интересные результаты.

Казалось бы, близ берегов океана отвес должен отклоняться всегда в сторону материка, как отклоняется он по направлению к горным массивам. Опыт не оправдывает этого ожидания. Маятник же свидетельствует, что на океане и на его островах напряжение силы тяжести сильнее, чем близ берегов, а возле берегов — больше, чем вдали от них, на материке. О чем это говорит? О том, очевидно, что толща Земли под материками составлена из более легких веществ, чем под дном океанов. Из таких физических фактов геологи черпают ценные указания для суждения о породах, слагающих кору нашей планеты.

Незаменимые услуги оказал подобный способ исследования при выявлении причин так называемой «Курской магнитной аномалии». Приведу несколько строк отчета одного из ее исследователей [1].

---

[1] Исследования в районе Курской аномалии производились не с отвесом, а с особыми крутильными весами (так называемым «вариометром»). Нить прибора закручивается под действием притяжения подземных масс. Точность показаний этого удивительного прибора равна одной биллионной (10^{-12}) доле грамма! Притяжение больших гор вариометр «чувствует» на расстоянии 300 *км*. Вот краткое описание прибора (из статьи проф. П. М. Никифорова о Курской аномалии):

«Главную часть прибора составляют крутильные весы, изображенные схематически на рис. 17. Коромысло M_1E из тонкой алюминиевой трубки имеет длину около 40 *см:* к одному концу коромысла прикреплен золотой груз M_1 цилиндрической формы (30 г), к другому подвешивается на проволоке EM_2 золотой подвесок M_2 (30 *г*). Коромысло подвешено на весьма тонкой платиново-иридиевой нити AO, длиною 60—70 *см.* Для защиты от конвекционных токов воздуха крутильные весы окружаются оболочкой с тройными металлическими стенками. В приборе имеются две пары крутильных весов, повернутых на 180° относительно друг друга»: S — плоское зеркало.

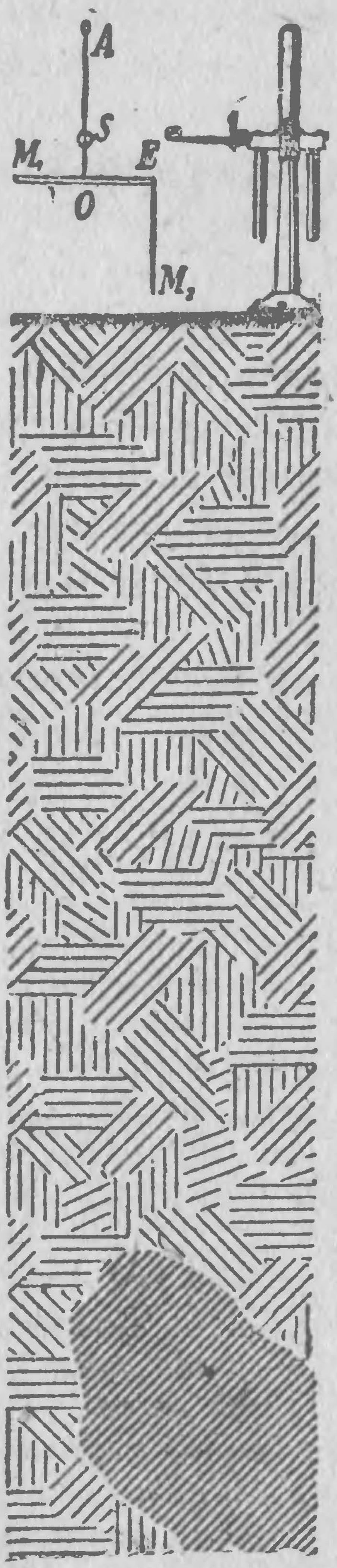


Рис. 17. Вверху направо—вариометр. Вверху налево—схема устройства прибора.

«...Можно с полной определенностью утверждать о наличии под земною поверхностью значительных притягивающих масс, причем граница этих масс с западной стороны... устанавливается с совершенной отчетливостью. Вместе с тем представляется вероятным, что эти массы простираются преимущественно в восточном направлении, имея восточный скат более пологим, чем западный».

Известно, какое важное промышленное значение придается тем огромным источникам железа, которые обнаружены в районе Курской аномалии. Запасы железной руды исчисляются здесь десятками миллиардов тонн, составляя половину мирового запаса. Приведу также некоторые результаты исследования аномалий (отклонений от нормы) силы тяжести на восточных склонах Урала (выполнено в 1930 г. ленинградскими астрономами):

«Около Златоуста мы имеем наибольший максимум в силе тяжести, соответствующий подъему кристаллического массива Уральского хребта.

«Второй максимум к востоку от Козырево характеризует приближение к поверхности земли погруженного хребта.

«Третий максимум к востоку от Мишкино вновь дает указание о приближении древних пород к земной поверхности.

«И наконец, четвертый максимум к западу от Петропавловска вновь указывает на приближение тяжелых пород» (Б. В. Нумеров).

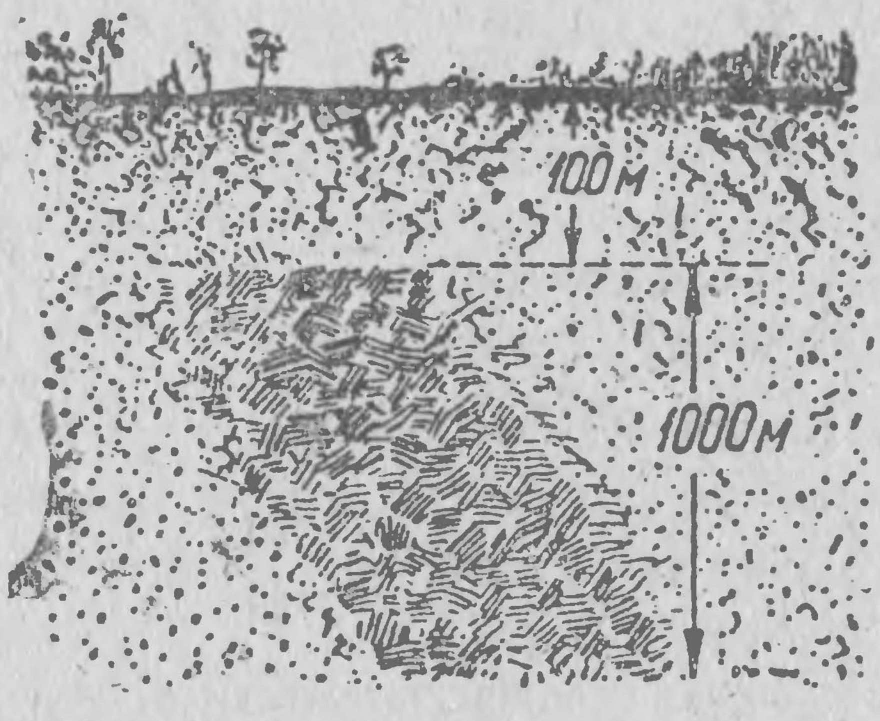


Рис. 18. Причина курской аномалии: шток железной руды мощностью около тысячи метров на глубине ста метров.

Перед нами два из многочисленных примеров того, как физика создает основу для научных построений и практических применений в других, казалось бы, далеких от нее областях.

МАЯТНИК В ВОДЕ

Задача

Вообразите, что маятник стенных часов качается в воде. Чечевица его имеет «обтекаемую» форму, которая сводит почти к нулю сопротивление воды ее движению. Какова окажется продолжительность качания такого маятника: больше, чем вне воды, или меньше? Проще говоря: будет ли маятник качаться в воде быстрее, чем в воздухе, или медленнее?

Решение

Так как маятник качается в несопротивляющейся среде, то, казалось бы, нет причины, которая могла бы изменить скорость его качания. Между тем опыт показывает, что маятник в таких условиях качается **медленнее**.

Это загадочное на первый взгляд явление объясняется выталкивающим действием воды на погруженные в нее тела. Оно как бы уменьшает вес маятника, не изменяя его массы. Значит, маятник в воде находится совершенно в таких же условиях, как если бы он был перенесен на другую планету, где ускорение силы тяжести слабее. Из формулы, приведенной в предыдущей статье, $t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, следует, что с уменьшением ускорения силы тяжести (g) время колебания (t) должно возрасти: маятник будет колебаться медленнее.

НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Задача

Сосуд с водой стоит на наклонной плоскости (рис. 19). Пока он неподвижен, уровень AB воды в нем, конечно, горизонтален. Но вот сосуд начинает скользить по хорошо смазанной плоскости CD. Останется ли уровень воды в сосуде горизонтальным, пока сосуд скользит по плоскости?

Решение

Опыт показывает, что в сосуде, движущемся без трения по наклонной плоскости, уровень воды устанавливается параллельно этой плоскости. Объясним почему.

Вес P каждой частицы (рис. 20) можно представить себе разложенным на две составляющие силы: Q и R. Сила P увлекает частицы воды и сосуда в движение вдоль наклонной плоскости CD; при этом частицы воды будут оказывать на стенки сосуда такое же давление, как и в случае покоя (вследствие одинаковости скоростей движения). Сила же Q придавливает частицы воды ко дну сосуда. Действие всех отдельных сил Q на воду будет такое же, как и действие силы тяжести на частицы всякой покоящейся жидкости: уровень воды установится перпендикулярно к направлению силы Q, т. е. параллельно длине наклонной плоскости.

А как установится уровень воды в баке, который (например, вследствие трения) скользит вниз по уклону равномерным движением?

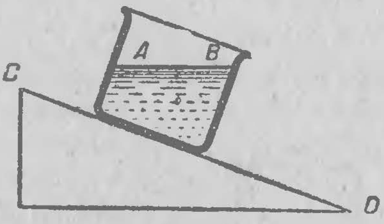


Рис. 19. Сосуд с водой скользит под уклон. Как расположится уровень воды?

Легко видеть, что в таком баке уровень должен стоять не наклонно, а горизонтально. Это следует уже из того, что равномерное движение не может внести в ход механических явлений никаких изменений по сравнению с состоянием покоя (классичес[кий] принцип относительности).

Но следует ли это такж[е] из приведенного ранее объяснения? Конечно. Ведь в сл[уч]ае равномерного движения сосуда по наклонной плоскости частицы стенок сосуда не получают никакого ускорения; частицы же жидкости в сосуде, находясь под действием силы R, будут силой R придавливаться к передней стенке сосуда. Следовательно, каждая частица воды будет находиться под действием двух придавливающих сил R и Q, равнодействующая которых и есть вес P частицы, направленный вертикально. Вот почему уровень воды должен в этом случае установиться го-

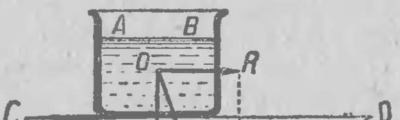


Рис. 20. Решение задачи рис. 19.

ризонтально. Только в самом начале движения, когда сосуд, до получения постоянной скорости, еще движется ускоренно[1], уровень воды принимает на мгновение наклонное положение.

КОГДА ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНИЯ НЕ ГОРИЗОНТАЛЬНА?

Если бы в сосуде или в баке, скользящем вниз без трения, находился, вместо воды, человек с плотничьим уровнем, он наблюдал бы странные явления. Тело его прижималось бы к наклонному дну сосуда совершенно так же, как в случае покоя прижимается к горизонтальному дну (только с меньшей силой). Значит, для такого человека наклонная плоскость дна сосуда становится словно горизонтальной. Соответственно этому, те направления, которые он до начала движения считал горизонтальными, принимают для него наклонное положение. Перед ним была бы необычайная картина: дома, деревья стояли бы косо, поверхность пруда расстилалась бы наклонно, весь ландшафт повернулся бы «набекрень». Если бы удивленный «пассажир» не поверил своим глазам и приложил ко дну бака уровень, инструмент показал бы ему, что оно горизонтально. Словом, для такого человека горизонтальное направление не было бы горизонтально в обычном смысле слова.

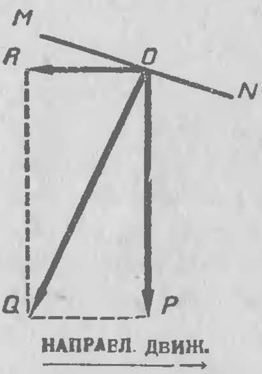


Рис. 21. Какие силы действуют на предметы в вагоне трогающегося поезда?

---

[1] Надо помнить, что тело не может прийти в равномерное движение мгновенно: переходя от покоя к равномерному движению, тело не может миновать состояния ускоренного движения, — состояния хотя бы весьма кратковременного.

Надо заметить, что вообще всякий раз, когда мы не сознаем уклонения нашего собственного тела от отвесного положения, мы приписываем наклон окружающим предметам. Пьяный, шатаясь, воображает, что все кругом него покачивается. Помните у Некрасова:

Крестьянам показалося,
Как вышли на пригорочек,
Что все село шатается,
Что даже церковь старую
С высокой колокольнею
Шатнуло раз-другой...

Горизонтальный пол может утратить для вас свое горизонтальное положение даже и в том случае, когда вы движетесь не по наклону, а по строго горизонтальному пути. Это бывает, например, при подходе поезда к станции или при отходе от нее, — вообще в таких частях пути, где вагон идет з а м е д л е н н о или у с к о р е н н о. Вот как описывает ощущения, испытываемые при этом пассажиром, французский физик Ш. Гильом:

«Когда поезд начинает замедлять свой ход, мы можем сделать удивительное наблюдение: нам покажется, что пол понижается в направлении движения поезда; мы будем думать, что идем вниз, когда шагаем вдоль вагона в направлении движения, и всходим вверх, когда идем в обратном направлении. А при отправлении поезда со станции пол как бы наклоняется в сторону, противоположную движению».

«Мы можем устроить опыт, — пишет он далее, — выясняющий причину кажущегося отклонения плоскости пола от горизонтального положения. Для этого достаточно иметь в вагоне чашку с вязкой жидкостью, например глицерином: во время ускорений движения поверхность жидкости принимает наклонное положение. Вам не раз случалось, без сомнения, наблюдать нечто подобное на водосточных жолобах вагонов: когда поезд в дождь подходит к станции, вода из жолобов на вагонных крышах стекает вперед, а при отходе поезда—назад. Происходит это оттого, что поверхность воды поднимается у края, противоположного направлению, в каком совершается ускорение хода».

Разберемся в причине этих любопытных явлений; причем будем рассматривать их не с точки зрения покоящегося наблюдателя, находящегося вне вагона, а с точки зрения такого наблюдателя, который, помещаясь внутри вагона, сам участвует в ускоренном движении и, следовательно, относит все наблюдаемые явления к себе, словно считая себя неподвижным. Когда вагон движется ускоренно, а мы считаем себя покоящимися, то напор задней стенки вагона на наше тело (или увлекающее действие сидения) воспринимается нами так, словно мы сами напираем на стенку (или увлекаем сиденье) с равной силой. Мы подвержены тогда действию двух сил: силы R, направленной обратно движению вагона, и силы веса P, прижимающей нас к полу. Равнодействующая Q изобразит то направление, которое мы в таком состоянии будем считать отвесным. Направление MN, перпендикулярное к новому отвесу, станет для нас горизонтальным. Следовательно, прежнее горизонтальное направление OR будет казаться поднимающимся в сторону движения поезда и имеющим уклон в обратном направлении (рис. 22).

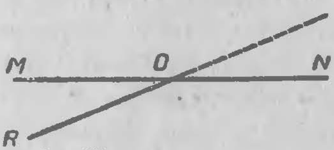


Рис. 22. Почему пол трогающегося вагона кажется наклонным?

Что произойдет при таких условиях с жидкостью в тарелке? Для этого представим себе, что новое «горизонтальное» направление не совпадает с уровнем жидкости, а следует (рис. 23) по линии MN. Это наглядно видно на рисунке, где стрелка указывает направление движения вагона. Теперь ясно, почему вода должна вылиться через задний край тарелки (или дождевого жолоба).

Картину всех явлений, происходящих в вагоне в момент отправления, легко представить себе, если вообразить, что вагон наклонился соответственно новому положению «горизонтальной» линии (см. заставку этой главы). Вы поймете, почему стоящие в вагоне люди должны при этом упасть назад. Этот всем известный факт обычно объясняют тем, что ноги увлекаются полом вагона в движение, в то время как туловище и голова еще находятся в покое.

Сходного объяснения придерживался и Галилей, как видно из следующего отрывка:

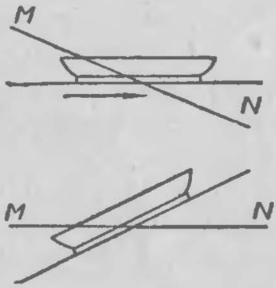


Рис. 23. Почему в трогающемся вагоне жидкость переливается через задний край блюдца?

«Пусть сосуд с водою имеет поступательное, ио неравномерное движенне, меняющее скорость н то ускоренное, то замедленное. Вот какне будут последствия неравномерностн. Вода не вынуждена разделять двнжения сосуда. При уменьшенни скорости сосуда она сохраняет приобретенное стремление и прнтечет к переднему концу, где н образуется поднятне. Еслн, напротнв того, скорость сосуда увелнчнвается, вода сохранит более медленное движенне, отстанет и прн заднем конце заметно поднимется».

Такое объяснение в общем не хуже согласуется с фактами, чем приведенное ранее. Для науки представляет ценность то объяснение, которое не только согласуется с фактами, но и дает возможность учитывать их количественно. В данном случае мы должны предпочесть поэтому объяснение, которое было изложено раньше, — именно, что пол под ногами перестает быть горизонтальным. Оно дает возможность учесть явление количественно, чего нельзя сделать, придерживаясь обычной точки зрения.

Если, например, ускорение поезда при отходе со станции равно 1 метру в секунду за секунду, то угол QOP (рис. 21) между новым и старым отвесным направлением легко вычислить из треугольника QOP, где $QP : OP = 1 : 9{,}8 =$ $=$ около $0{,}1$;

$$\operatorname{tg} QOP = 0{,}1; \angle QOP = 6^\circ.$$

Значит, отвес, подвешенный в вагоне, должен в момент отхода отклониться на 6°. Пол под ногами словно наклонится на 6°, и идя вдоль вагона, мы будем испытывать такое же ощущение, как и при ходьбе по дороге с уклоном в 6°. Обычный способ рассмотрения этих явлений не помог бы нам установить такие подробности.

Читатель заметил, без сомнения, что расхождение двух объяснений обусловлено лишь различием точек зрения: обыденное объяснение относит явления к неподвижному наблюдателю вне вагона, второе же объяснение относит те же явления к наблюдателю, самому участвующему в ускоренном движении.

МАГНИТНАЯ ГОРА

В Калифорнии, близ города Голливуда, знаменитого центра кинематографической промышленности, есть гора, о которой местные автомобилисты (т. е. добрых три четверти населения) утверждают, что она обладает магнитными свойствами. Дело в том, что на небольшом участке дороги, длиною 60 *м*, наблюдаются у подножия этой горы необыкновенные явления. Участок этот идет наклонно. Если у автомобиля, едущего вниз по наклону, выключить мотор, то машина катится назад, т. е. вверх по уклону, подчиняясь магнитному притяжению горы.

Это поразительное свойство горы считалось установленным настолько достоверно, что в соответствующем месте дороги красуется даже доска с описанием феномена.

Нашлись, однако, люди, которым показалось сомнительным, чтобы гора могла притягивать автомобили. Для проверки произвели нивелировку участка дороги под горой. Результат получился неожиданный: то, что все

Рис. 24. Мнимая магнитная гора в Калифорнии.

принимали за подъем, оказалось спуском с уклоном в 2°. Такой уклон может заставить автомобиль катиться без мотора на очень хорошем шоссе.

В горных местностях подобные обманы зрения довольно обычны и порождают немало легендарных рассказов.

РЕКИ, ТЕКУЩИЕ В ГОРУ

Сходной иллюзией зрения объясняются и рассказы путешественников о реках, вода которых течет вверх по уклону. Привожу выписку об этом из книги немецкого физиолога проф. Бернштейна «Внешние чувства»:

«Во многих случаях мы склонны ошибаться при суждении о том, горизонтально ли данное направление, наклонено ли оно вверх, или вниз. Идя, например, по слабо наклоненной дороге и видя в некотором расстоянии другую дорогу, встречающуюся с первой, мы представляем себе подъем второй дороги более крутым, чем на самом деле. С удивлением убеждаемся мы затем, что вторая дорога вовсе не так крута, как мы ожидали».

Рис. 25. Слабо наклонная дорога вдоль ручья.

Объясняется эта иллюзия тем, что дорогу, по которой мы идем, мы принимаем за основную плоскость, к которой относим наклон других направлений. Мы бессознательно отождествляем ее с горизонтальной плоскостью — и тогда естественно представляем себе преувеличенным наклон другого пути.

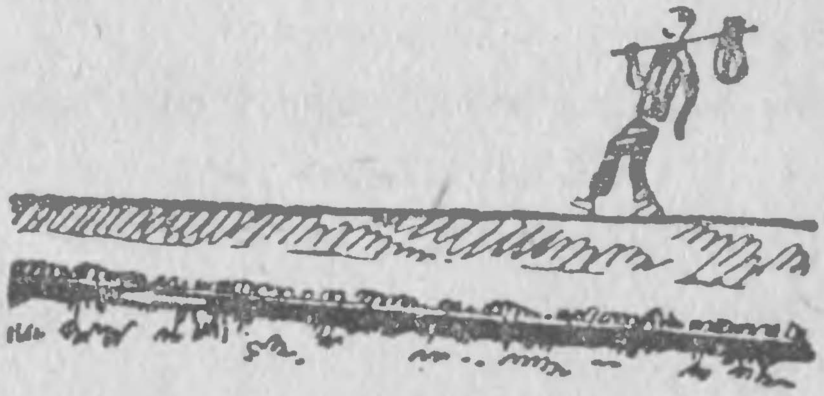


Рис. 26. Пешеходу на дороге кажется, что ручей течет вверх.

Этому способствует то, что мышечное наше чувство совсем не улавливает при ходьбе наклонов в 2—3 градуса. На улицах Москвы, Киева и других холмистых городов часто приходится наблюдать иллюзию, о которой говорит немецкий ученый. Еще любопытнее тот обман зрения, которому случается поддаваться в неровных местностях: ручей кажется нам текущим в гору!

«При спуске по слабо наклонной дороге, идущей вдоль ручья (рис. 25), который имеет еще меньшее падение, т. е. течет почти горизонтально, — нам часто кажется, что ручей течет вверх по уклону (рис. 26). В этом случае мы тоже считаем направление дороги горизонтальным, так как привыкли принимать ту плоскость, на которой мы стоим, за основу для суждения о наклоне других плоскостей» (Бернштейн).

ЗАДАЧА О ЖЕЛЕЗНОМ ПРУТЕ

Железный прут просверлен строго посредине. Через отверстие проходит тонкая прочная спица, вокруг которой, как вокруг горизонтальной оси, прут может вращаться (рис. 27). В каком положении остановится прут, если его закружить?

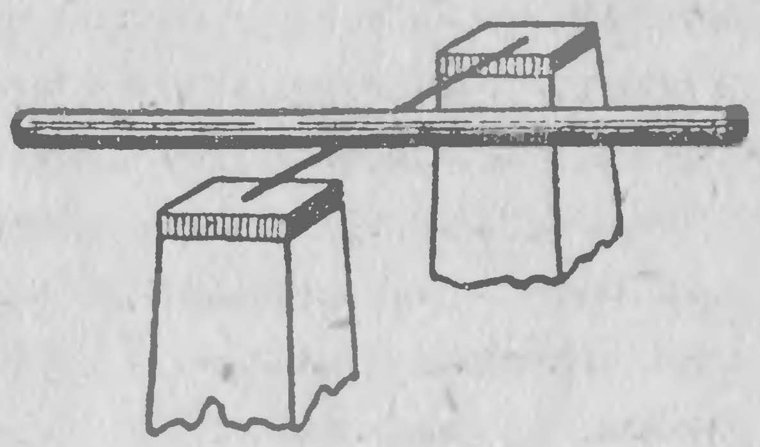


Рис. 27. Прут уравновешен на оси. Если его закружить, в каком положении он остановится?

Часто отвечают, что прут остановится в горизонтальном положении, «единственном, при котором он сохраняет равновесие». С трудом верят, что прут, подпертый в центре тяжести, должен сохранять равновесие в л ю б о м положении.

Почему же правильное решение столь простой задачи представляется многим невероятным? Потому, что обычно имеют перед глазами опыт с палкой, подвешенной за середину: такая палка устанавливается горизонтально. Отсюда делается поспешный вывод, что подпертый на оси прут тоже должен сохранять равновесие только в горизонтальном положении.

Однако подвешенная палка и подпертый прут находятся не в одинаковых условиях. Просверленный прут, опирающийся на ось, подперт строго в центре тяжести, а потому находится в так называемом безразличном

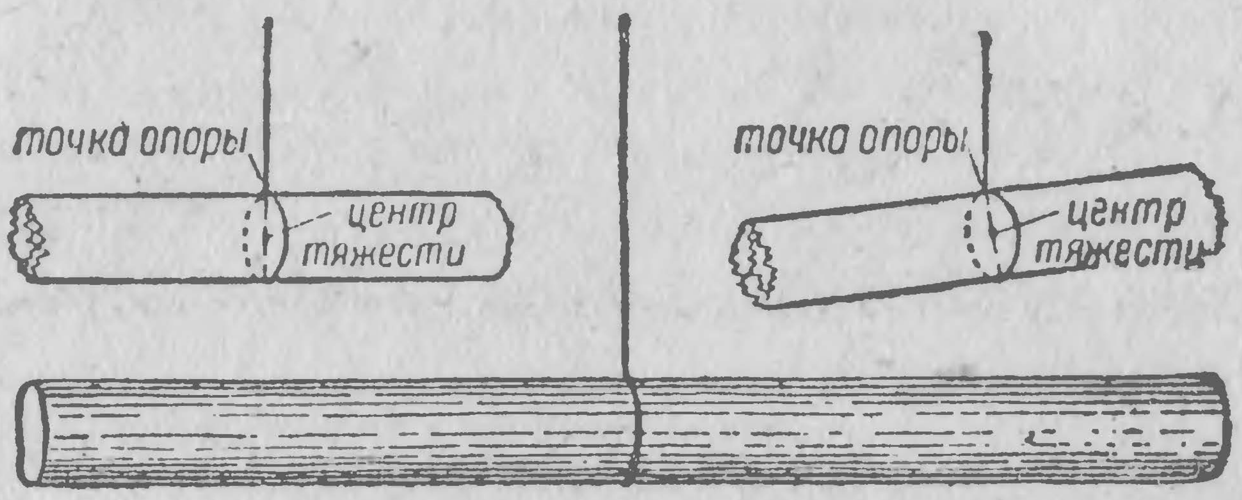
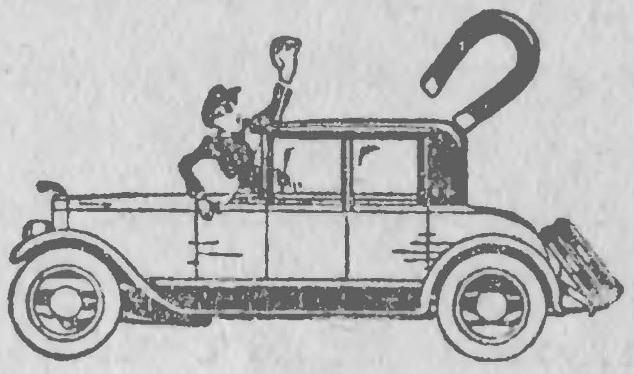
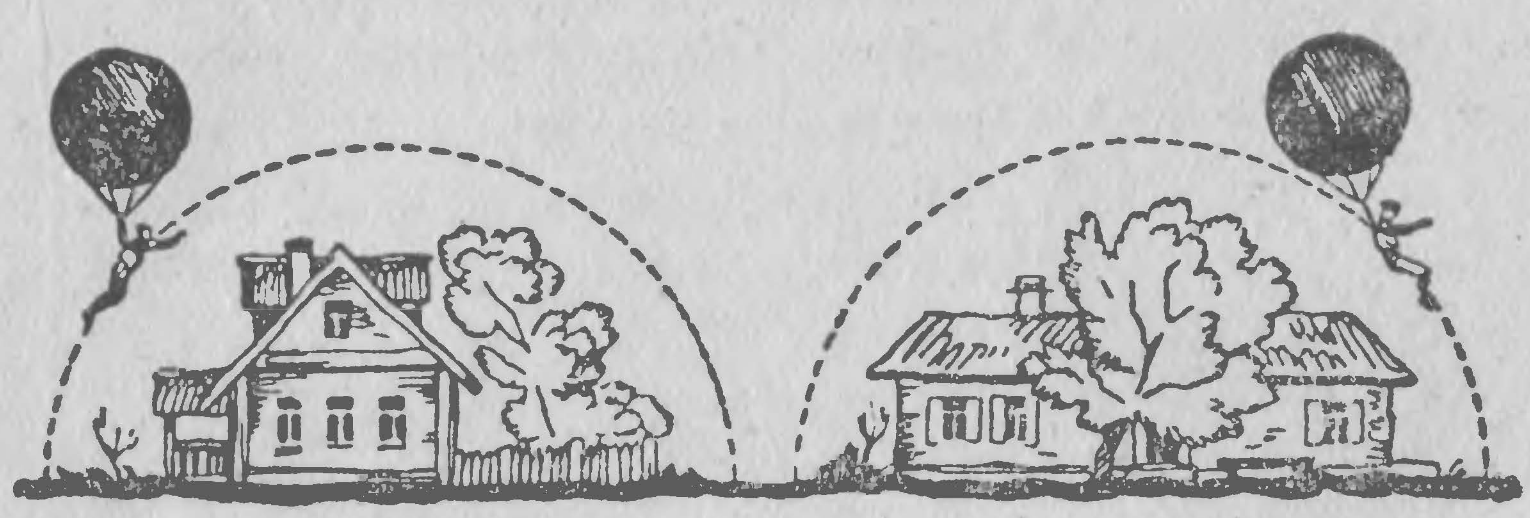


Рис. 28. Почему палка, подвешенная за середину, занимает горизонтальное положение?

равновесии. Палка же, подвешенная на нити, имеет точку привеса не в центре тяжести, а в ы ш е его (рис. 28). Тело, так подвешенное, будет находиться в покое только тогда, когда его центр тяжести лежит на одной отвесной линии с точкой привеса, т. е. при горизонтальном положении палки; при наклонении центр тяжести отходит от отвесной линии (рис. 28). Эта привычная картина и мешает многим согласиться с тем, что прут на горизонтальной оси может удержаться в равновесии в наклонном положении.





Глава четвертая

ПАДЕНИЕ И БРОСАНИЕ

СЕМИМИЛЬНЫЕ САПОГИ

Сказочные сапоги эти реально осуществляются теперь в своеобразной форме: в виде дорожного чемодана средних размеров, содержащего в себе оболочку маленького аэростата и прибор для добывания водорода. В любой момент спортсмен извлекает из чемодана оболочку, надувает ее водородом и делается обладателем воздушного шара 5 *м* в диаметре. Подвязав себя к этому шару, человек может совершать огромные прыжки в высоту и в длину. Опасность быть совсем увлеченным ввысь не угрожает такому аэронавту, потому что подъемная сила шара все же немного меньше веса человека.

При старте первого советского стратостата «СССР», поставившего мировой рекорд высоты, такие шары («прыгуны») оказали существенную услугу команде: они помогли освободить запутавшиеся веревки стратостата.

Интересно рассчитать, какой высоты прыжки может совершать спортсмен, снабженный подобным шаром-прыгуном.

Пусть вес человека только на 1 *кг* превышает подъемную силу шара. Другими словами, человек, снабженный шаром, словно весит 1 *кг*, — в 60 раз меньше нормального. Сможет ли он делать и прыжки в 60 раз бо́льшие?

Посмотрим.

Человек, привязанный к аэростату, увлекается вниз вместе с шаром силой в 1000 *г* или около 1 000 000 дин. Вес самого шара-прыгуна, как легко рассчитать, равен около 20 *кг*. Значит, сила в 1 000 000 дин действует на массу в $20 + 60 = 80$ *кг*. Ускорение a, приобретаемое массой в 80 *кг* от силы в 1 000 000 дин, равно:

$$a = \frac{f}{m} = \frac{1\,000\,000}{80\,000} = \text{около } 12 \ cm/cek^2.$$

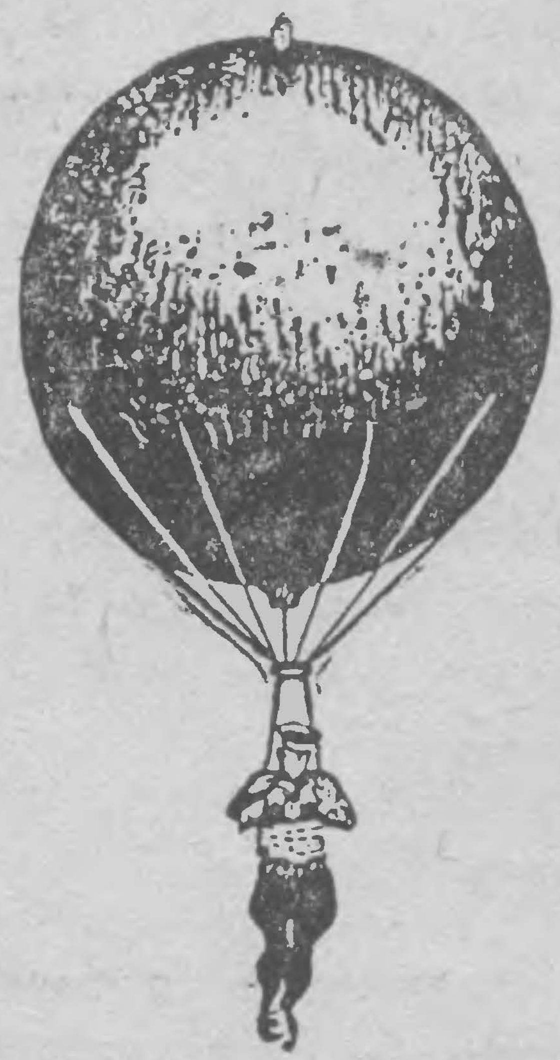


Рис. 29. Шар-прыгун. Внизу—в сложенном виде.

Человек при нормальных условиях может подпрыгнуть с места на высоту не выше 1 *м*. Соответствующую начальную скорость v получаем из формулы $v^2 = 2gh$;

$$v^2 = 2 \times 980 \times 100 \quad cm^2/cek^2.,$$

откуда

$$v = \text{около } 440 \ cm/cek.$$

Подвязанный к шару человек при прыжке сообщает своему телу во столько раз меньшую скорость, во сколько раз масса человека вместе с шаром больше массы человека самого по себе. (Это следует из формулы $ft = mv$; сила f и продолжительность t ее действия в обоих случаях одинаковы; значит, одинаковы и количества движения mv; отсюда ясно, что скорость изменяется обратно пропорционально массе.) Итак, начальная скорость при прыжке с шаром равна:

$$440 \times \frac{60}{80} = 330 \text{ см/сек.}$$

Теперь легко уже вычислить высоту h прыжка по формуле $v^2 = 2ah$:

$$330^2 = 2 \times 12 \times h,$$

откуда

$$h = 4500 \text{ см} = 45 \text{ м.}$$

Итак, сделав наибольшее усилие, которое при обычных условиях подняло бы тело спортсмена на 1 *м*, человек с шаром подпрыгнет на высоту 45 *м*.

Интересно вычислить продолжительность подобных прыжков. Прыжок вверх на 45 *м* при ускорении в 12 *см* в сек.^{2} должен длиться $\left(\text{формула } h = \frac{at^2}{2}\right)$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9\,000}{12}} = 27 \text{ сек.}$$

Чтобы прыгнуть вверх и вернуться, надо затратить 52 сек.

Такие медлительные, плавные прыжки обусловлены, конечно, незначительностью ускорения. Подобные ощущения при подпрыгивании мы могли бы без аэростата пережить только на каком-нибудь крошечном астероиде, где ускорение тяжести значительно (в 60 раз) слабее, чем на нашей планете.

Любопытно выполнить еще один расчет — определить д л и н у наибольшего прыжка. Чтобы сделать прыжок в длину, спортсмен должен дать себе толчок под некоторым углом к горизонту. Пусть он сообщает при этом своему телу скорость v (черт. 30). Разложим ее на две составляющие: вертикальную v_1 и горизонтальную v_2. Они соответственно равны:

$$v_1 = v \sin\alpha;$$
$$v_2 = v \cos\alpha.$$

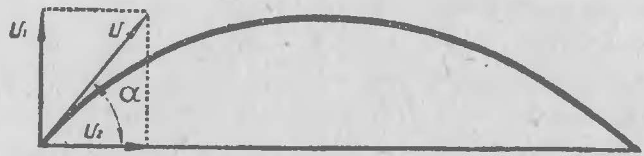


Рис. 30. Как летит тело, брошенное под углом к горизонту.

Скорость v_1 истощится через t секунд, причем

$$v_1 = at,$$

откуда

$$t = \frac{v_1}{a}.$$

Значит, продолжительность подъема тела вместе со спуском равна:

$$2t = \frac{2v\sin\alpha}{a}.$$

Скорость v_2 будет относить тело равномерно в горизонтальном направлении в течение всего промежутка времени, пока оно будет двигаться вверх и вниз. За этот промежуток времени тело перенесется на расстояние

$$S = 2v_2t = 2v\cos\alpha\cdot\frac{v\sin\alpha}{a} = \frac{2v^2}{a}\sin\alpha\cos\alpha = \frac{v^2\sin 2\alpha}{a}.$$

Это и есть длина прыжка.

Наибольшей величины достигнет она при $\sin 2\alpha = 1$, так как синус не может быть больше единицы. Отсюда $2\alpha = 90°$ и $\alpha = 45°$. Значит, при отсутствии сопротивления атмосферы спортсмен сделает самый длинный прыжок тогда, когда оттолкнется от Земли под углом к ней, равным половине прямого. Величину этого наибольшего прыжка узнаем, если в формулу

$$S = \frac{v^2\sin 2\alpha}{a}$$

подставим $v = 330$ *см/сек*, $\sin 2\alpha = 1$; $a = 12$ *см/сек²*.

Получим

$$S = \frac{330^2}{12} = 90 \text{ м}.$$

Прыжки вертикальные — около 45 *м* и под углом в 45° на расстояние 90 *м* — дают возможность прыгать через многоэтажные дома [1].

Вы можете проделать в миниатюре подобные опыты, если к детскому воздушному шарику подвяжете бумажного спортсмена, вес которого немного превышает подъемную силу шара. При легком толчке фигурка будет высоко подпрыгивать и затем опускаться вниз. Однако в этом случае сопротивление воздуха, несмотря на малую скорость, будет играть более заметную роль, чем при прыжках настоящего спортсмена.

ЧЕЛОВЕК-БОМБА

«Человек-бомба» — поучительный номер цирковой программы, показывавшийся в последнее время во многих городах Европы; в 1934 г. он демонстрировался в московском цирке, затем в ленинградском. Состоит он в том, что артист помещается в канале пушки, выбрасывается оттуда выстрелом, описывает высокую дугу в воздухе и падает на сетку в 30 *м* от орудия (рис. 31). Аналогичный номер мы все видели в известном кино-фильме «Цирк», в котором артистка совершает полет из пушки под купол цирка.

Слова: пушка и выстрел — нам следовало бы поставить в кавычках, потому что это не настоящая пушка и не

[1] Полезно запомнить, что вообще наибольшая дальность падения тела, брошенного под углом (в 45°) к отвесной линии, равна двойной высоте отвесного подъема при той же начальной скорости.

настоящий выстрел. Хотя из жерла орудия и вырывается клуб дыма, но артист выбрасывается не силой порохового взрыва. Дым устраивается лишь для эффекта, чтобы поразить зрителей. На деле же движущей силой

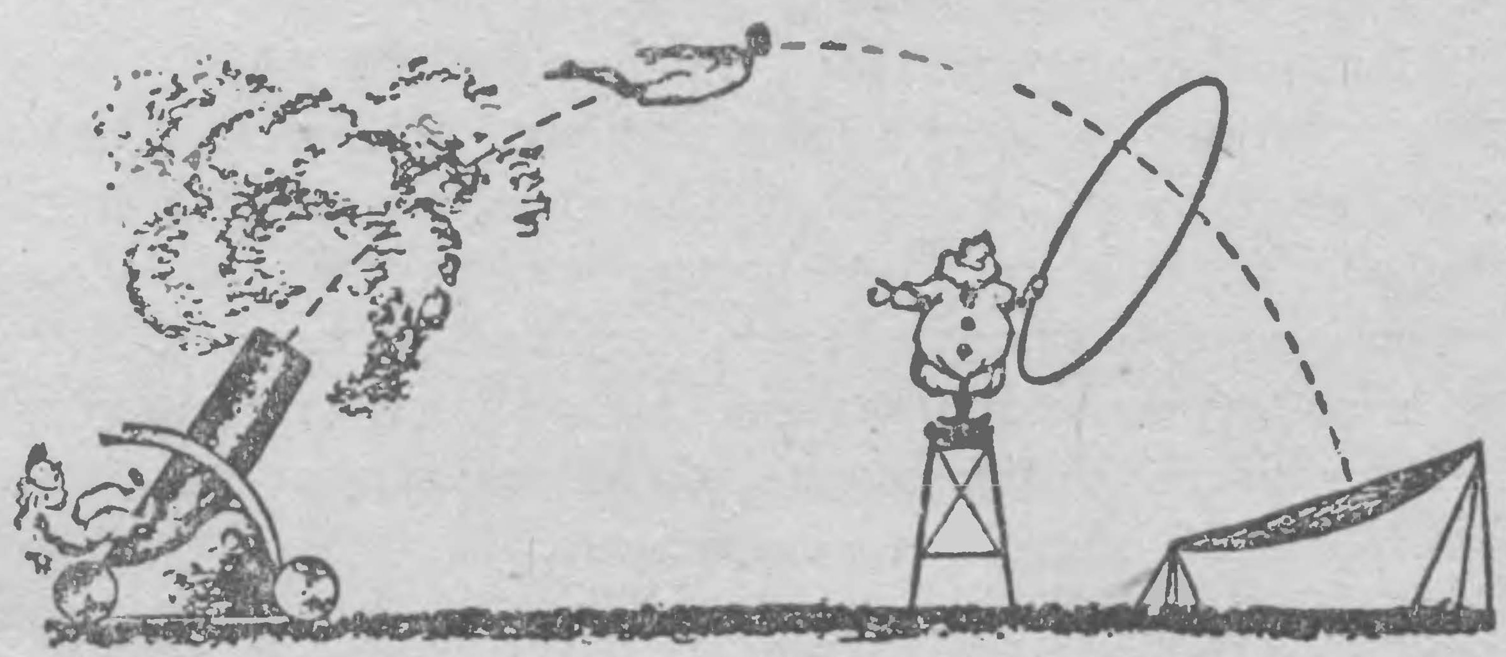


Рис. 31. „Человек-снаряд" в цирке.

является пружина, одновременно со спуском которой появляется бутафорский дым: создается иллюзия, что человек-бомба выстреливается пороховым зарядом.

На рис. 32 изображена схема описываемого циркового номера. Вот числовые данные о номере, выполняемом искуснейшим из «людей-бомб», артистом Лейнертом, который подвизался в цирках СССР:

Наклон пушки	70°
Наибольшая высота полета . .	19 м
Длина ствола пушки	6 „

Для механики представляют большой интерес те совершенно исключительные условия, в которых оказывается организм артиста при выполнении этого номера. В момент выстрела тело его подвергается давлению, ощущаемому как усиленная тяжесть. Затем, во время свободного полета, артист, подобно всякому свободно брошенному телу, ничего ни весит[1]. Наконец в момент падения на сетку артист снова подвергается действию усиленной тяжести. Названный выше артист переносил все это без вреда для здоровья. Интересно в точности установить эти условия, так как будущие моряки вселенной, которые отважатся отправиться на ракетном корабле в мировое пространство, должны будут пережить подобные же ощущения.

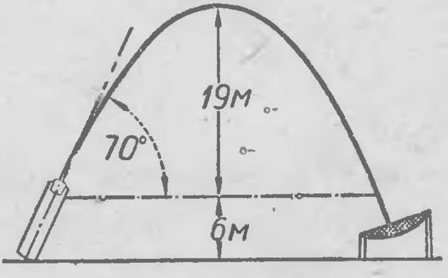


Рис. 32. Схема полета „человека-снаряда".

В первой фазе движения артиста, которая протекает еще внутри пушки, нас интересует величина искусственной тяжести. Мы узнаем ее, если вычислим ускорение тела в канале пушки. Для этого необходимо знать проходимый телом путь, т. е. длину пушки, а также скорость, приобретаемую в конце этого пути. Первый известен —6 *м*. Скорость же можно вычислить, зная, что это та скорость, с какой надо подбросить свободное тело, чтобы оно взлетело на высоту 19 *м*.

В предыдущей статье мы вывели формулу:

$$t = \frac{v \sin \alpha}{a},$$

где t — продолжительность подъема вверх, v — начальная скорость, α — угол, под которым брошено тело, a — ускорение. Кроме того, известна высота h подъема вверх.

---

[1] См. мои книги «Занимательная физика», кн. 2-я, а также «Межпланетные путешествия», изд. 9-е, 1934.

Так как

$$h=\frac{gt^2}{2}=\frac{g}{2}\cdot\frac{v^2\sin^2\alpha}{g^2}=\frac{v^2\sin^2\alpha}{2g},$$

то можно вычислить скорость v:

$$v=\frac{\sqrt{2gh}}{\sin\alpha}.$$

Значение букв, входящих в формулу, нам понятно: $g=9{,}8$ *м/сек*^{2}, $\alpha=70^\circ$. Что касается высоты подъема h, то, как видно из черт. 32, мы должны принять ее равной $25-6=19$ *м*. Итак, искомая скорость

$$v=\frac{\sqrt{19{,}6\times19}}{0{,}94}=20{,}6 \text{ м.}$$

С такой скоростью тело артиста покидает пушку, и, следовательно, такую скорость имеет оно у жерла орудия. Пользуясь формулой $v^2=2aS$, имеем

$$a=\frac{v^2}{2S}=\frac{20{,}6^2}{12}=35 \text{ м/сек за сек.}$$

Мы узнали, что ускорение, с каким движется тело артиста в стволе орудия, равно 35 *м/сек* за секунду, т. е. в $3\frac{1}{2}$ раза больше обычного ускорения силы тяжести. Поэтому артист будет в момент выстрела чувствовать себя в $4\frac{1}{2}$ раза тяжелее обычного: к нормальному его весу прибавился $3\frac{1}{2}$-кратный искусственный вес [1].

Сколько времени длится ощущение усиленного веса?

Из формулы $S=\frac{at^2}{2}=\frac{at\times t}{2}=\frac{vt}{2}$ имеем:

$$6=\frac{20{,}6\times t}{2},$$

[1] Это не строго верно, потому что искусственная тяжесть действует под углом 20° к отвесу, нормальная же направлена отвесно. Однако разница невелика.

откуда

$$t=\frac{12}{20{,}6}=0{,}6\ \text{сек.}$$

Значит, артист более полсекунды будет ощущать, что он весит не 70 *кг*, а около 300 *кг*.

Перейдем теперь ко второй фазе циркового номера — к свободному полету артиста в воздухе. Здесь нас интересует продолжительность полета; сколько времени артист не ощущает никакого веса?

В предыдущей статье мы установили (стр. 74), что продолжительность подобного полета равна:

$$\frac{2v\sin\alpha}{a}.$$

Подставив известные нам значения букв, узнаем, что искомая продолжительность равна:

$$\frac{2\times 20{,}6\times\sin 70^\circ}{9{,}8}=3{,}9\ \text{сек.}$$

Состояние полной невесомости длится около 4 секунд.

В третьей фазе полета определим, как и в первой, величину искусственной тяжести и продолжительность этого состояния. Если бы сетка находилась на уровне жерла пушки, артист достиг бы ее с такой же скоростью, с какой начал свой полет. Но сетка поставлена несколько ниже, и оттого скорость артиста будет больше; однако разница весьма мала, и, чтобы не усложнять расчетов, мы ею пренебрежем. Принимаем, следовательно, что артист достиг сетки со скоростью 20,6 *м* в секунду. Измерено, что, упав на сетку, артист вдавливает ее на 1,5 *м*. Значит, скорость 20,6 *м* превращается в нуль на пути 1,5 *м*. По формуле $v^2=2aS$ имеем:

$$20{,}6^2=2a\times 1{,}5,$$

откуда ускорение

$$a=\frac{20,6^2}{2\times 1,5}=141\ \text{м/сек}^2.$$

Мы узнали, что, вдавливая сетку, артист подвергается ускорению в 141 *м/сек²* — в 14 раз большему, чем нормальное ускорение тяжести. В течение этого времени он чувствовал себя в 15 раз тяжелее нормального своего веса! Это необычайное состояние длилось, однако, всего

$$\frac{2\times 1,5}{20,6}=\text{около}\ \frac{1}{7}\ \text{сек.}$$

Даже привычный организм циркача не мог бы безнаказанно перенести 15-кратное усиление тяжести, если бы это не длилось столь ничтожное время. Ведь человек 70 *кг* весом приобретает вес целой тонны! Длительное действие такой нагрузки должно было бы раздавить человека, во всяком случае лишить его возможности дышать, т. к. мускулы не смогут «поднять» столь тяжелую грудную клетку.

РЕКОРД БРОСАНИЯ МЯЧА

Задача

На областной колхозно-совхозной спартакиаде в Харькове в 1934 г. физкультурница Синицкая в бросании мяча двумя руками установила новый всесоюзный рекорд: 73 *м* 92 *см*.

Как далеко должен закинуть мяч физкультурник в Ленинграде, чтобы побить этот рекорд?

Решение

Казалось бы ответ простой: надо закинуть мяч хотя бы на 1 *см* дальше. Как ни странно это покажется иным спортсменам, такой ответ неверен. Если бы кто-нибудь закинул мяч в Ленинграде на дистанцию даже на 5 *см* короче, он — при правильной оценке — должен быть признан побившим рекорд Синицкой.

Наш читатель, вероятно, догадывается, в чем дело. Дальность бросания зависит от ускорения силы тяжести, а тяжесть в Ленинграде сильнее, чем в Харькове. Сравнивать достижения в обоих пунктах, не учитывая различия в напряжении тяжести — неправильно: в Харькове физкультурник поставлен природой в более благоприятные условия, чем в Ленинграде.

Остановимся на теории. При отсутствии сопротивления воздуха тело, брошенное под углом α к горизонту со скоростью v, падает на расстоянии:

$$S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Величина g ускорения силы тяжести в различных пунктах различна, и в частности, например, равна на широте

Архангельска (64°30′)	982	*см/сек*^{2}
Ленинграда (60°)	981,9	„
Харькова (50°)	981,1	„
Каира (30°)	979,3	„

Из приведенной формулы для дальности бросания видно, что при равных прочих условиях дистанция обратно пропорциональна величине g. Несложный расчет показывает, что усилие рук, бросающее в Харькове мяч на 73 *м* 92 *см*, уносит тот же мяч в других местах на следующие расстояния:

в Архангельске	73 *м* 85 *см*
в Ленинграде	73 „ 86 „
в Каире	74 „ 5 „

Итак, чтобы побить в Ленинграде рекорд харьковской физкультурницы, закинувшей мяч на 73 *м* 92 *см*, достаточно превзойти дистанцию 73 *м* 86 *см*. Каирский спортсмен, повторивший харьковский рекорд, на самом деле отстал бы от него на 12 *см*, а архангельский физкультурник, бросивший мяч на дистанцию, 7-ю сантиметрами меньшую, нежели Синицкая, в действительности побил бы поставленный ею рекорд.

ПО ХРУПКОМУ МОСТУ

Озадачивающий случай описывает Жюль Верн в романе «В 80 дней вокруг света». Висячий железнодорож-

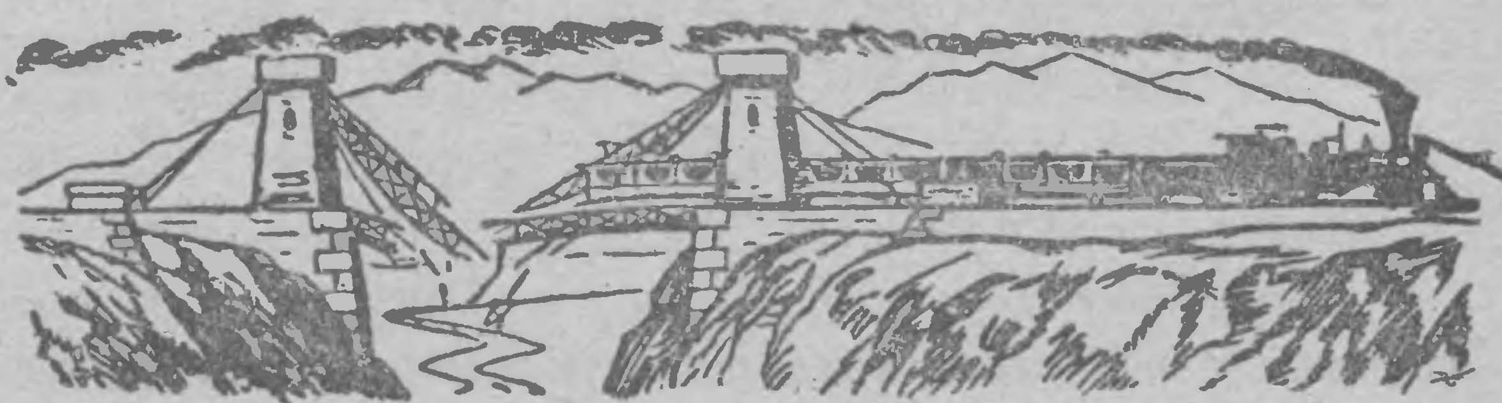


Рис. 33. Эпизод с мостом в романе Жюля Верна.

ный мост в Скалистых горах (Америка) грозил обрушиться из-за поврежденных ферм. Тем не менее бравый машинист, «истый янки», решил вести по нему пассажирский поезд.

«— Но мост может обрушиться!

«— Это не имеет значения; пустив поезд на всех парах, мы имеем шанс проехать.

«Поезд пошел вперед с невероятной скоростью. Поршни делали 20 ходов в секунду. Оси дымились. Поезд словно не касался рельсов. Вес был уничтожен скоростью... Мост был пройден. Поезд перепрыгнул через него с одного берега на другой. Но едва успел он переехать реку, как мост с грохотом обрушился в воду».

Правдоподобна ли эта история? Можно ли «уничтожить вес скоростью»? Мы знаем, что железнодорожное полотно при быстром ходе поезда страдает больше, чем при медленном; на слабых участках пути предписывается поэтому итти тихим ходом. В данном же случае спасение было именно в быстром ходе. Возможно ли это?

Оказывается, описанный случай не лишен правдоподобия. При известных условиях поезд мог избегнуть крушения, несмотря на то, что мост под ним разрушается. Все дело в том, что поезд пронесся через мост в чрезвычайно малый промежуток времени. В столь краткий миг мост просто не успел обрушиться... Вот примерный расчет. Ведущее колесо пассажирского паровоза имеет диаметр 1,3 *м*. «Двадцать ходов поршня в секунду» дают 10 полных оборотов ведущего колеса, т. е. 10 раз по $3{,}14 \times 1{,}3$. Это составляет 41 *м*; такова секундная скорость. Горный поток был, вероятно, не широк; длина моста могла быть, скажем, метров 10. Значит, при своей чудовищной скорости поезд пронесся по нему в $^1/_4$ секунды. Если бы даже мост начал разрушаться с первого мгновения, то передняя его часть за $^1/_4$ секунды успела опуститься на

$$\frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9{,}8 \times \frac{1}{16} = \text{около } 0{,}3 \text{ м},$$

т. е. на 30 *см*. Мост оборвался не на обоих концах сразу, а сначала на том конце, на который въехал паровоз. Пока эта часть моста начинала свое падение, опускаясь на первые сантиметры, противоположный конец еще сохранял связь с берегом, так что поезд (весьма короткий) мог пожалуй успеть проскользнуть на противоположный берег прежде, чем разрушение дошло до этого конца. В таком смысле и надо понимать образное выражение романиста: «вес был уничтожен скоростью».

Неправдоподобие эпизода состоит в другом: в «20 ходах поршня в секунду», порождающих 150-километровую часовую скорость. Такой скорости паровоз того времени развить не мог.

Надо заметить, что нечто сходное с подвигом американского машиниста проделывают иногда конькобежцы: они рискуют быстро проскальзывать по тонкому льду, который наверное проломился бы под ними при медленном движении.

ТРИ ПУТИ

Задача

На отвесной стене начерчен круг (рис. 34), диаметр которого равен 1 *м*. От верхней его точки вдоль хорд AB и AC идут желобки. Из точки A одновременно пущены три дробинки: одна свободно падает вниз, две другие скользят (не катаясь) по гладким желобкам. Какая из трех дробинок раньше достигнет окружности?

Решение

Так как путь по желобку AC самый короткий, то можно подумать, что, скользя по нему, дробинка достигнет окружности раньше других. Второе место в состязании должна, повидимому, занять дробинка, скользящая вдоль AB; и, наконец, последней достигнет окружности дробинка, падающая отвесно.

Опыт обнаруживает ошибочность этих заключений; все дробинки достигают окружности одновременно!

Причина в том, что дробинки движутся с различной скоростью: быстрее всех движется свободно падающая, а из двух скользящих по жолобам быстрее та, путь которой наклонен круче. По более длинным путям дробинки, как видим, движутся быстрее, и можно доказать, что выигрыш от большой скорости как раз покрывает потерю от длинного пути.

В самом деле, продолжительность t падения по отвесной линии AD (если отвлечься от сопротивления воздуха) определяется по формуле:

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

откуда

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

Продолжительность t_1 движения по хорде — например, по AC — равна:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2AC}{a}},$$

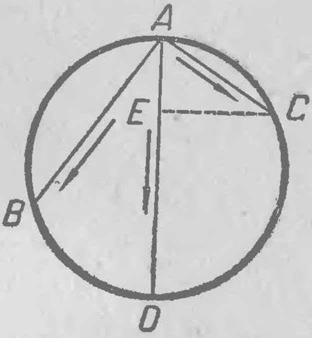


Рис. 34. Задача о трех дробинках.

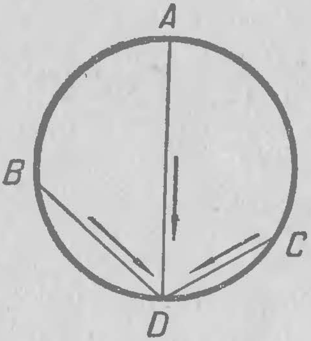


Рис. 35. Задача Галилея.

где a — ускорение движения по наклонной линии AC. Но легко установить, что

$$\frac{a}{g} = \frac{AE}{AC} \quad \text{и} \quad a = \frac{AE \cdot g}{AC}.$$

Рис. 34 показывает, что

$$\frac{AE}{AC} = \frac{AC}{AD}$$

и следовательно

$$a = \frac{AC}{AD} \cdot g.$$

Значит,

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot AC}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot AC \cdot AD}{AC \cdot g}} = \sqrt{\frac{2AD}{g}} = t.$$

Итак, $t = t_1$, т. е. продолжительность движения по хорде и по диаметру одинакова. Это относится, конечно, не только к AC, но и ко всякой вообще хорде, проведенной из точки A.

Ту же задачу можно поставить и в иной форме. Три тела движутся силой тяжести по линиям AD, BD и CD, лежащим в отвесном круге (рис. 35). Движение началось одновременно в точках A, B и C. Какое тело раньше достигнет точки D?

Читатель не затруднится теперь доказать самостоятельно, что тела должны достичь точки D одновременно.

Рассмотренная задача была поставлена и разрешена Галилеем в книге «Беседы о двух новых отраслях науки» (есть русский перевод), где впервые изложены открытые им законы падения тел.

Там находим доказательство теоремы, формулированной Галилеем так: «Если из высшей точки круга, построенного над горизонтом, проведены различные наклонные плоскости, доведенные до окружности, то времена падения по ним одинаковы».

ЗАДАЧА О ЧЕТЫРЕХ КАМНЯХ

С вершины башни брошены с одинаковой скоростью четыре камня: один — отвесно вверх, второй — отвесно вниз, третий — горизонтально вправо, четвертый — горизонтально влево.

Какую форму имеет тот четырехугольник, в вершинах которого будут находиться камни во время падения? Сопротивления воздуха в расчет не принимать.

Решение

Большинство приступает к решению этой задачи с мыслью, что падающие камни должны расположиться в вершинах четырехугольника, форма которого напоминает фигуру бумажного змея. Рассуждают так: камень, брошенный вверх, удаляется от исходной точки медленнее, чем брошенный вниз; брошенные же в стороны летят по кривым линиям с некоторой промежуточной скоростью. Забывают при этом подумать о том, с какой скоростью опускается центральная точка искомой фигуры.

Легче получить правильное решение, рассуждая иначе. Именно, сделаем сначала допущение, что тяжести нет вовсе. В таком случае, конечно, четыре брошенных камня располагались бы в каждый момент на вершинах квадрата. Но что изменится, если мы введем в действие тяжесть? В несопротивляющейся среде все тела падают с одинаковой скоростью. Поэтому наши четыре камня под действием силы тяжести опустятся на одно и то же расстояние, т. е. квадрат перенесется параллельно самому себе и сохранит фигуру квадрата.

Итак, брошенные камни расположатся в вершинах квадрата.

К сейчас рассмотренной задаче примыкает

ЗАДАЧА О ДВУХ КАМНЯХ

С вершины башни брошены два камня со скоростью трех метров в секунду: один — отвесно вверх, другой — отвесно вниз. С какой скоростью они удаляются один от другого? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение

Рассуждая, как в предыдущем случае, мы легко придем к правильному выводу: камни удаляются один от другого со скоростью $3 + 3$, т. е. 6 метров в секунду. Скорость падения здесь, как ни странно, никакого значения не имеет: ответ одинаков для любого небесного тела — для Земли, Луны, Юпитера и т. п.

ИГРА В МЯЧ

Задача

Игрок бросает мяч своему партнеру, находясь в 28 *м* от него. Мяч летит четыре секунды. Какой наибольшей высоты достиг мяч?

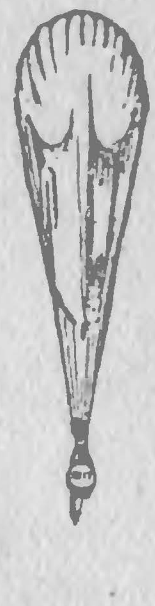
Решение

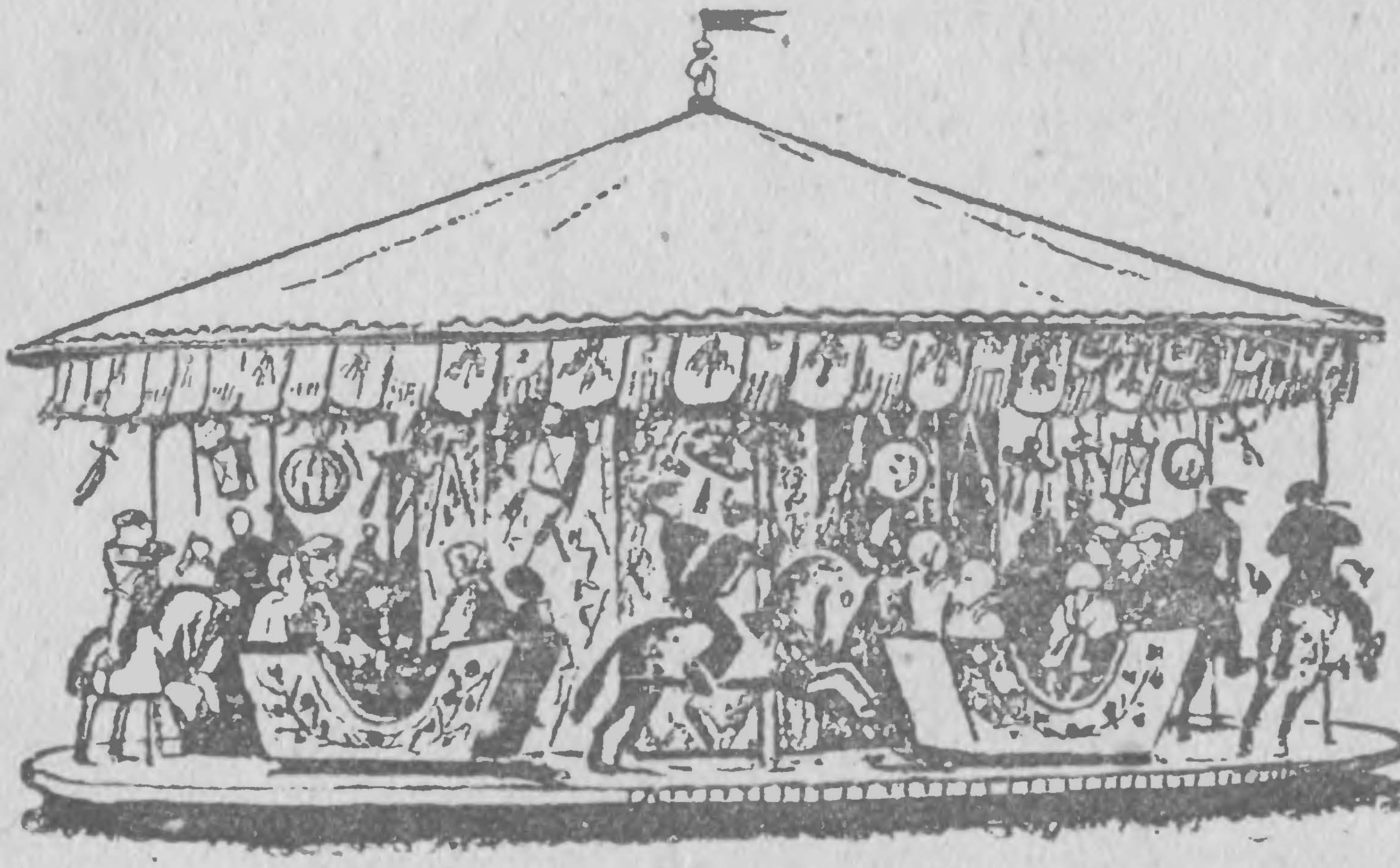
Мяч двигался 4 секунды, совершая одновременно перемещение в горизонтальном и в отвесном направлениях. Значит, на подъем и обратное падение он употребил 4 секунды, — из них 2 секунды на подъем и 2 на падение (в учебниках механики доказывается, что продолжительность подъема равна продолжительности падения). Следовательно, мяч опустился на расстояние:

$$s = \frac{gt^2}{2} = \frac{9{,}8 \times 2^2}{2} = 19{,}6 \text{ м}.$$

Итак, наибольшая высота подъема мяча была около 20 *м*. Расстояние между игроками (28 *м*) — данное, которым нам не пришлось воспользоваться.

При столь умеренных скоростях можно пренебрегать сопротивлением воздуха.





Глава пятая

КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

ПРОСТОЙ СПОСОБ ПРИБАВИТЬСЯ В ВЕСЕ

Мы часто желаем своим больным знакомым «прибавиться в весе». Если бы речь шла только об этом, то добиться увеличения веса можно очень скоро без усиленного питания и заботы о своем здоровьи: достаточно только сесть в карусель. Катающиеся на карусели обычно и не подозревают, что, сидя в возке, они буквально прибавляются в весе. Несложный расчет покажет нам величину прибавки.

Пусть (рис. 36) MN — та ось, вокруг которой обращаются возки карусели. Когда карусель вращается, возок, подвешенный к ней, стремясь вместе с пассажиром двигаться по инерции в направлении касательной и, следовательно, удалиться от оси, занимает наклонное положение, показанное на рис. 36. Вес P пассажира разлагается при этом на две силы: одна — сила R направлена горизонтально в сторону оси и является той центростремительной силой, которая поддерживает круговое движение; другая — Q направлена вдоль веревки и придавливает пассажира к возку; она ощущается пассажиром, как вес. Новый вес, мы видим, больше нормального P и равен $\frac{P}{\cos\alpha}$. Чтобы найти величину угла α между P и Q, надо знать величину силы R. Сила эта центростремительная; следовательно, порождаемое ею ускорение

$$a = \frac{v^2}{r},$$

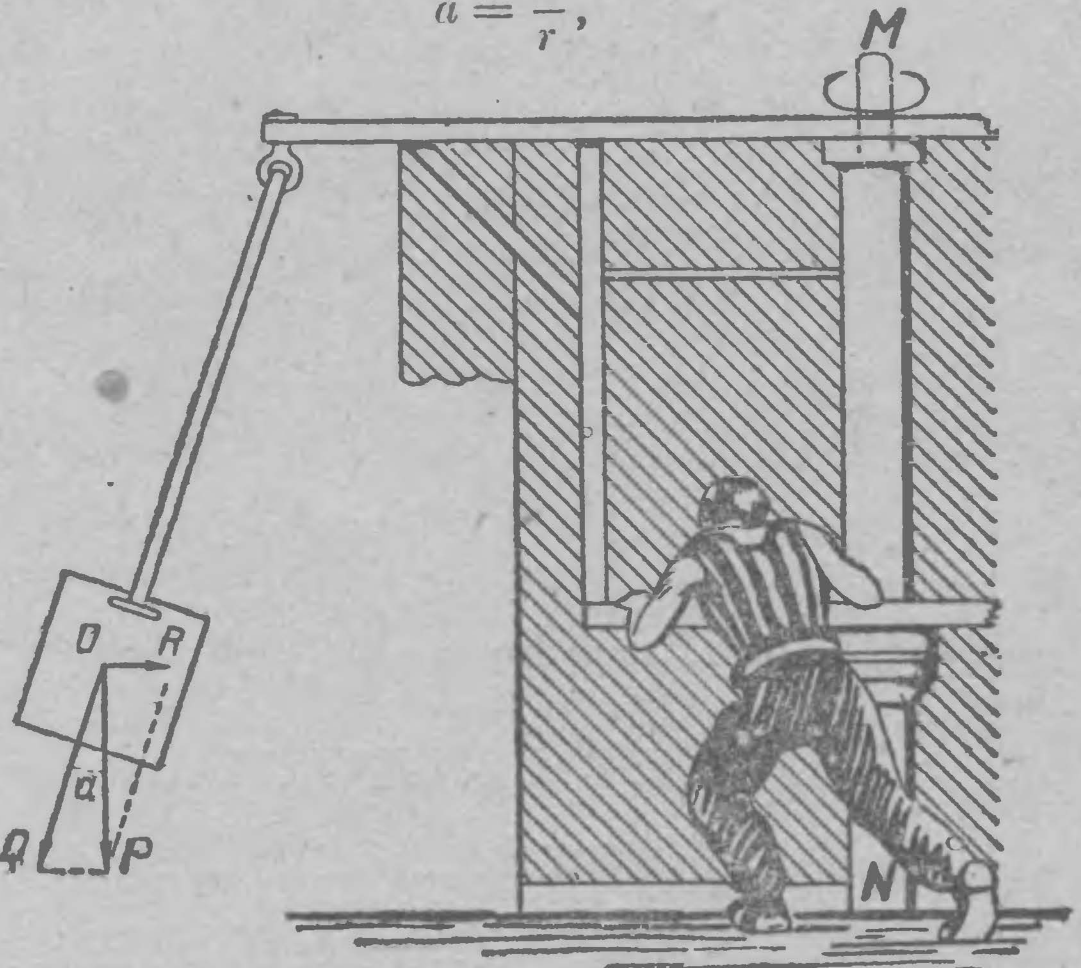


Рис. 36. Живой двигатель карусели. Показаны силы, действующие на возок.

где v — окружная секундная скорость возка, а r — радиус кругового движения, т. е. расстояние центра тяжести возка от оси MN. Пусть это расстояние 6 *м*, а число оборотов карусели — 4 в минуту; значит, в секунду возок описывает $^1/_{15}$ полного круга. Отсюда его окружная скорость:

$$v = \frac{1}{15} \times 2 \times 3{,}14 \times 6 = 2{,}5 \textit{ м/сек.}$$

Теперь находим величину ускорения, порождаемого силой R:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{600} = 104 \textit{ см/сек}^2.$$

Так как силы пропорциональны ускорениям, то

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{104}{980} = 0{,}1;\ \alpha = 7^\circ.$$

Мы установили раньше, что новый вес $Q = \frac{P}{\cos\alpha}$. Значит,

$$Q = \frac{P}{\cos 7^\circ} = \frac{P}{0{,}994} = 1{,}006\ P.$$

Если больной при обычных условиях весил 60 *кг*, то сейчас он прибавится в весе примерно на 360 *г*. К сожалению, такая прибавка нисколько не улучшает здоровья; кружась на карусели, никто не чувствует себя здоровее, чем на «неподвижной» земле.

Если на обыкновенной, сравнительно медленно вращающейся карусели прибавка веса мало ощутительна, то на быстроходных центробежных приборах малого радиуса она доводится в некоторых случаях до огромной величины. В одной американской лаборатории употребляется прибор подобного рода — так называемая «ультрацентрифуга», вращающаяся часть которой делает 80 000 оборотов в минуту. Помощью этого прибора достигается возрастание веса в четверть миллиона раз! Каждая мельчайшая капелька жидкости, исследуемой на этом приборе, при нормальном весе в 1 миллиграмм, превращается в тяжелое тело весом в четверть килограмма.

Теперь вы, вероятно, будете осторожнее и станете высказывать знакомым пожелание прибавиться не в весе, а в массе.

НЕБЕЗОПАСНЫЙ АТТРАКЦИОН

Ко мне явились однажды за советом по поводу проекта нового аттракциона в одном из парков Москвы. Проект представлял нечто вроде «гигантских шагов», но к концам канатов (или штанг) предполагалось прикрепить аэропланы. При быстром вращении канаты должны откинуться и поднять вверх аэропланы с сидящими в них пассажирами. Устроители желали придать карусели такое число оборотов, чтобы канаты или штанги протянулись совершенно горизонтально.

Пришлось разочаровать их указанием, что здоровье пассажиров лишь до тех пор будет в безопасности, пока канат имеет довольно заметный наклон. Величину предельного отклонения каната от вертикали легко вычислить, исходя из того, что организм человека может переносить безвредно лишь трехкратное увеличение тяжести.

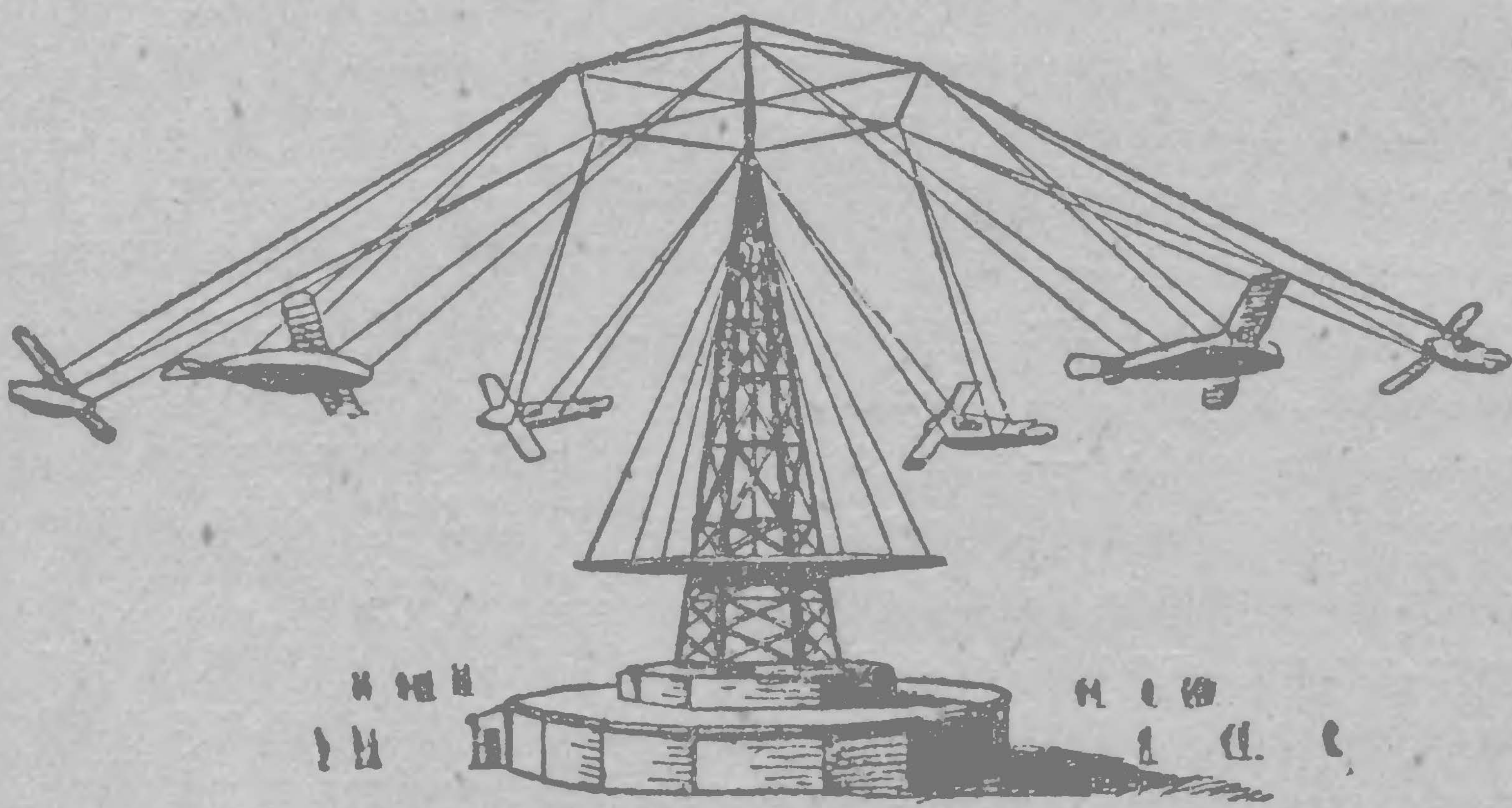


Рис. 37. Американская карусель с аэропланами.

Здесь нам пригодится рис. 36, которым мы пользовались в предыдущей статье. Мы желаем, чтобы искусственная тяжесть Q превосходила естественный вес P не более чем в 3 раза, т. е. чтобы лишь в предельном случае

$$\frac{Q}{P} = 3,$$

но

$$\frac{Q}{P} = \frac{1}{\cos\alpha};$$

следовательно

$$\frac{1}{\cos\alpha} = 3, \text{ и } \cos\alpha = 1/3 = 0{,}33,$$

откуда

$$\alpha = \text{около } 71°.$$

Итак, канат не должен отклоняться от отвесного положения более чем на 71° и, значит, не может приближаться к горизонтальному положению ближе чем на 19°.

Рис. 37 изображает, как осуществлен такого типа аттракцион в одном из городов Америки. Вы видите, что наклон канатов далеко не достигает здесь предельного.

НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ЗАКРУГЛЕНИИ

«Сидя в вагоне железной дороги, который двигался по кривой, — рассказывает физик Э. Мах, — я заметил вдруг, что деревья, дома, фабричные трубы близ дороги приняли наклонное положение».

Подобные явления часто наблюдаются пассажирами скорых поездов на Западе, где 100 *км/час* — не редкость.

Нельзя усматривать причину в том, что наружные рельсы на закруглениях укладываются выше внутренних и что, следовательно, вагон идет по дуге закругления в несколько косом положении. Если высунуться из окна и рассматривать окрестности не в наклонной рамке, — иллюзия остается.

После сказанного в предыдущих статьях едва ли нужно подробно объяснять истинную причину этого явления. Читатель уже догадался, вероятно, что отвес, висящий в вагоне, должен принять наклонное положение в тот момент, когда поезд огибает кривую. Эта новая вертикальная линия заменяет для пассажира прежнюю; оттого-то все, что имеет направление прежнего отвеса, становится для него косым [1].

---

[1] Так как вследствие вращения Земли, точки земной поверхности движутся по дугам, то и на «твердой земле» отвес не направлен строго к центру нашей планеты, а отклоняется от этого на-

Новое направление отвесной линии легко определяется из рис. 38. На нем буквой P обозначена сила тяжести, буквой R — сила центростремительная. Составляющая Q будет заменять для пассажира силу тяжести; все тела в вагоне будут падать в этом направлении. Величина угла α отклонения от отвесного направления определяется из уравнения:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{R}{P}.$$

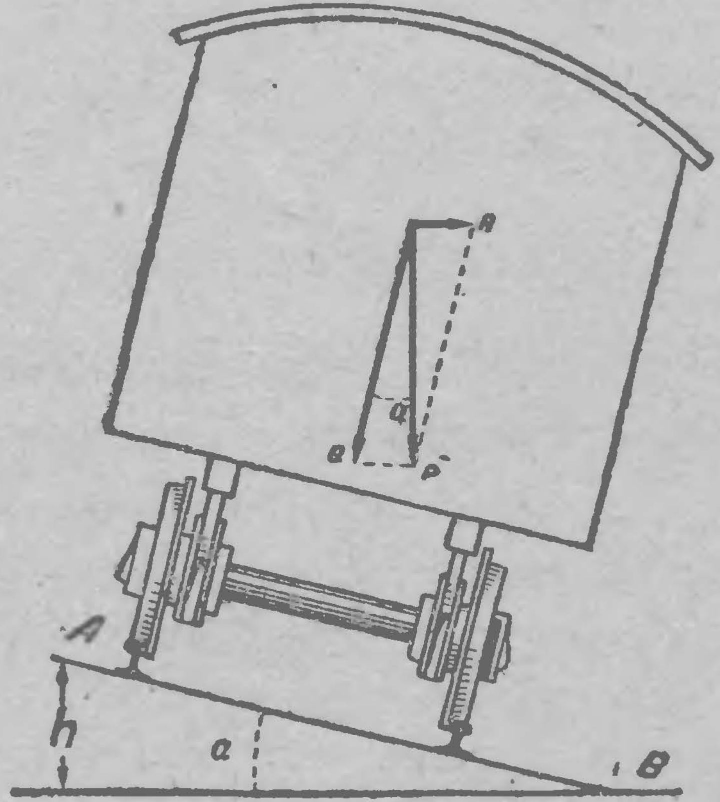


Рис. 38. Вагон идет по закруглению. Какие на него действуют силы? Внизу—поперечный наклон полотна дороги.

А так как сила R пропорциональна $\frac{v^2}{r}$, где v — скорость поезда, а r — радиус дуги закругления, сила же P пропорциональна ускорению тяжести g, то

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v^2}{r} : g = \frac{v^2}{rg}.$$

Пусть скорость поезда 18 *м/сек* (65 *км/час*), а радиус закругления — 600 *м*. Тогда

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{18^2}{600 \times 9{,}8} = 0{,}055,$$

откуда

$$\alpha = \text{около } 3^\circ.$$

Это мнимо-отвесное[1] направление мы неизбежно будем считать за отвесное, действительно же отвесные предметы покажутся нам наклоненными на 3°. При поездке на горной Сен-Готардской дороге с многочисленными кривыми участками, пассажиры видят порой окружающие отвесные предметы покосившимися градусов на 10.

Чтобы вагон на закруглении держался устойчиво, наружный рельс кривого пути возвышают над внутренним

правления на небольшой угол (на широте Ленинграда — 4′, на 45-й параллели — на наибольшую величину, 6′; на полюсе же и на экваторе вовсе не отклоняется).

[1] Вернее — «временно-отвесное» для данного наблюдателя.

на величину, соответствующую новому положению горизонтальной линии. Например, для сейчас рассмотренного закругления наружный рельс A (рис. 38) должен быть приподнят на такую величину h, чтобы

$$\frac{h}{AB} = \sin\alpha.$$

AB — ширина колеи — равна около 1,5 *м*; $\sin\alpha = \sin 3^\circ = 0{,}052$. Значит,

$$h = AB\sin\alpha = 1\,500 \times 0{,}052 \approx 80 \text{ мм}.$$

Наружный рельс должен быть уложен на 80 *мм* выше внутреннего. Легко понять, что это возвышение отвечает лишь определенной скорости, но изменять его соответственно скорости поезда нельзя; при устройстве закруглений имеют поэтому в виду некоторую преобладающую скорость движения.

ДОРОГА НЕ ДЛЯ ПЕШЕХОДОВ

Стоя у кривой части железнодорожного пути, мы едва ли заметили бы, что наружный рельс уложен здесь немного выше внутреннего. Другое дело — дорожка для велосипедов на велодроме: закругления в этих случаях имеют гораздо меньший радиус, скорость же довольно велика, так что угол наклона получается весьма значительный. При скорости, например, 72 *км/час* (20 *м/сек*) и радиусе 100 *м*, угол наклона определяется из уравнения

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{400}{100 \times 9{,}8} = 0{,}4,$$

откуда

$$\alpha = 22^\circ.$$

На подобной дороге пешеходу, разумеется, не удержаться. Между тем велосипедист только на такой дороге и чувствует себя вполне устойчиво. Любопытный парадокс тяжести! Так же устраиваются специальные дороги для состязания автомобилей.

В цирках приходится видеть нередко трюки еще более парадоксальные на взгляд, хотя также вполне согласные с законами механики. Велосипедист в цирке кружится в воронке («корзине»), радиус которой 5 и менее метров; при скорости 10 *м/сек* наклон стенок воронки должен быть очень крут:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{10^2}{5 \times 9{,}8} = 2,$$

откуда $\alpha = 63°$.

Зрителям кажется, что только необычайные ловкость и искусство помогают артисту удерживаться в таких явно неестественных условиях, между тем как в действительности для данной скорости это — самое устойчивое положение[1].

ЗЕМЛЯ НАБЕКРЕНЬ

Кому приходилось видеть, как круто наклоняется набок самолет, описывая горизонтальную петлю (делая «вираж»), у того естественно возникает мысль о серьезных предосторожностях, которые летчик должен принимать, чтобы не выпасть из аппарата. На деле, однако, летчик даже не ощущает, что машина его делает крен, — для него она держится в воздухе горизонтально. Зато он ощущает нечто другое: во-первых, испытывает усиленную тяжесть, во-вторых — видит, как наклоняется вся обозреваемая местность.

Сделаем примерный расчет того, на какой угол может для летчика при вираже наклониться горизонтальная поверхность и какой величины может достигать для него усиленная тяжесть.

---

[1] О велосипедных трюках см. также «Занимательную физику», кн. 2.

Возьмем числовые данные из действительности: летчик со скоростью 216 *км/час* (60 *м/сек*) описывает винтовую линию диаметром 140 *м* (рис. 39). Угол α наклона находим из уравнения

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{60^2}{70 \times 9{,}8} = 5{,}2,$$

откуда $\alpha = 79^\circ$. Теоретически земля должна для такого летчика стать не только «набекрень», но и почти «дыбом», отклоняясь всего на 11° от отвеса.

(На практике, вследствие, вероятно, физиологических причин, в подобных случаях земля кажется повернутой не на 79°, а на 69°, — см. рис. 40.)

Что касается усиленной тяжести, то отношение ее к естественной равно (рис. 38) обратной величине косинуса угла между их направлениями. Тангенс того же угла равен

$$\frac{v^2}{r} : g = 5{,}2.$$

По таблицам находим соответствующий косинус (0,19) и его обратную величину — 5,3.

Значит, летчик, делая такой вираж, прижимается к сидению в 6 раз сильнее, чем на прямом

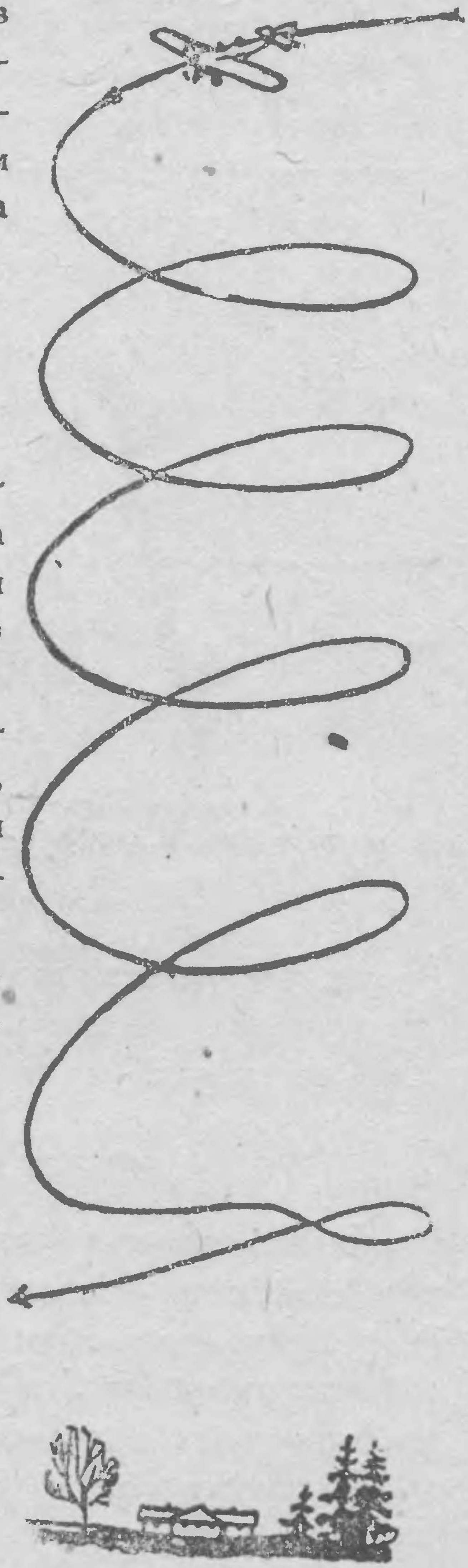


Рис. 39. Летчик описывает винтовую линию.

пути, т. е. чувствует себя примерно вшестеро тяжелее.

Искусственное увеличение веса может быть роковым для летчика. Известен случай, когда летчик, делая со своим аппаратом так называемый «штопор» (падение по винтовой кривой малого радиуса), не только не мог подняться с места, но бессилен был даже сделать движение рукой.

Рис. 40. Что кажется летчику рис. 39. (По Оберту.)

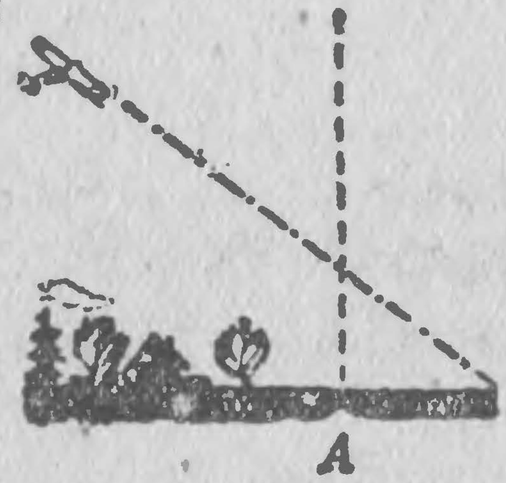


Рис. 41. Летчик летит по кривой большого радиуса (520 *м*) со скоростью 190 *км/час.*

Рис. 42. Что кажется летчику рис. 41.

Расчет показывает, что тело его стало тяжелее в 8 раз! Лишь с величайшим напряжением сил удалось ему спастись от гибели.

ПОЧЕМУ РЕКИ ИЗВИВАЮТСЯ?

Давно известна склонность рек извиваться подобно ползущей змее. Не следует думать, что извивание всегда обусловлено рельефом почвы. Местность может быть совершенно ровная, и все-таки ручей извивается. Это представляется довольно загадочным: казалось бы, в такой местности естественнее ручью избрать прямое направление.

Ближайшее рассмотрение обнаруживает, однако, неожиданную вещь: прямое направление даже для ручья, текущего по ровной местности, есть наименее устойчивое, а потому и наименее вероятное. Сохранить прямолинейность река может только при идеальных условиях, которые в действительности никогда не осуществляются.

Вообразим ручей, протекающий в приблизительно однородном грунте строго прямолинейно. Покажем, что такое течение долго сохраняться не будет. От случайных причин,—например, от неоднородности грунта,—течение ручья в каком-нибудь месте чуть искривилось.

Рис. 43. Малейший изгиб ручья неудержимо растет.

Что будет дальше? Выровнит ли река свое течение сама? Нет, искривление будет расти. В месте искривления (рис. 43) вода, двигаясь криволинейно, будет, вследствие центробежного эффекта, напирать на вогнутый берег *A*, подмывать его и в то же время отступать от выпуклого берега *B*. Для выпрямления же ручья нужно как раз обратное: подмывание выпуклого берега и отступание от вогнутого. Вогнутость станет от подмывания увеличиваться, кривизна излучины — возрастать, а вместе с тем будет увеличиваться и центробежная сила, которая, в свою очередь, усилит подмывание вогнутого берега. Достаточно, как видите, образоваться хотя бы самому незначительному изгибу, — и он будет расти неудержимо.

Мало того, уровень реки у вогнутого берега, к которому вода придавливается, стоит выше, чем у выпуклого (после сказанного в предыдущих статьях читатель понимает, конечно, почему); поэтому у дна реки возникает течение воды в поперечном направлении — от вогнутого берега к выпуклому, а вверху, разумеется, обратно: от выпуклого к вогнутому. Поперечное течение переносит продукты разрушения вогнутого берега к выпуклому; там они и оседают. По этой причине выпуклый берег становится покатым (еще более выпуклым), а вогнутый — крутым.

Так как случайные обстоятельства, вызывающие легкий первоначальный изгиб ручья, почти неизбежны, то неизбежно и образование излучин, непрестанно растущих и придающих реке спустя достаточный промежуток времени ее характерную извилистость. Эти извивы носят название «меандров», от реки Меандр (в западной части Малой Азии), змеевидное течение которой поразило древних и сделало название этой реки нарицательным.

Интересно проследить за дальнейшей судьбой речных извивов. Последовательные изменения вида речного русла упрощенно показаны на рис. 44 *a* — *h*. На рис. 44 *a* перед вами чуть изогнутая речка, на следующем 44 *b* — течение успело уже подточить вогнутый берег и несколько отступило от покатого выпуклого. На рис. 44 *c* русло реки еще больше расширилось, а на рис. 44 *d* превратилось уже в ши-

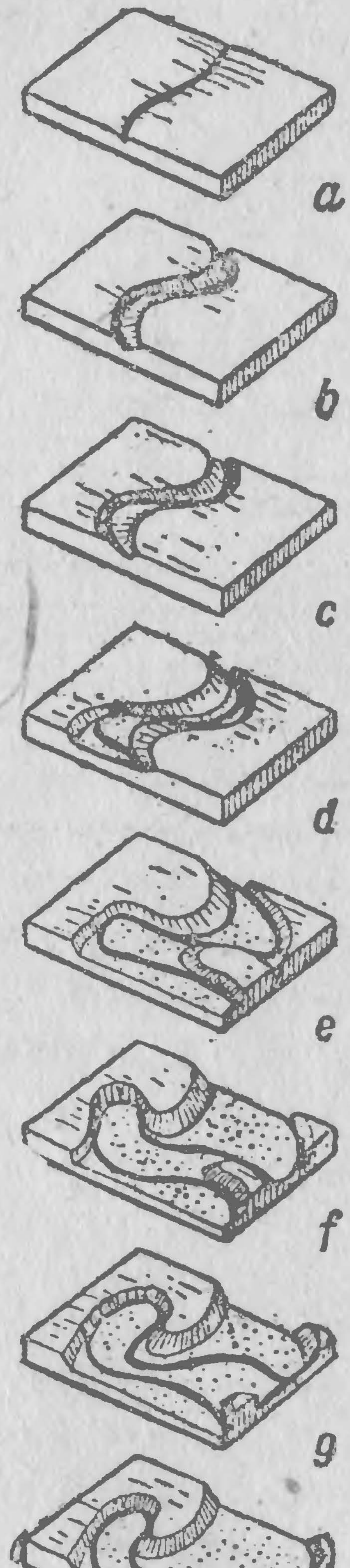
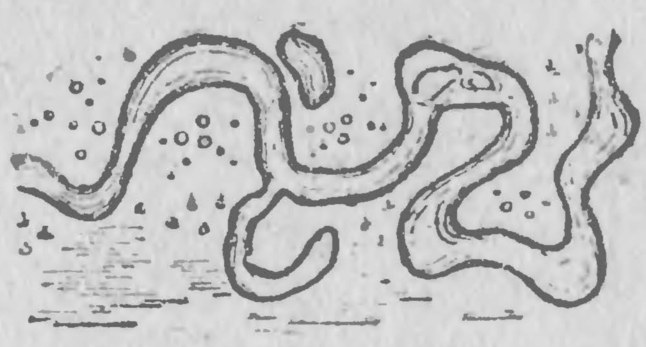


Рис. 44. Как постепенно увеличивается само собою искривление речного ложа.

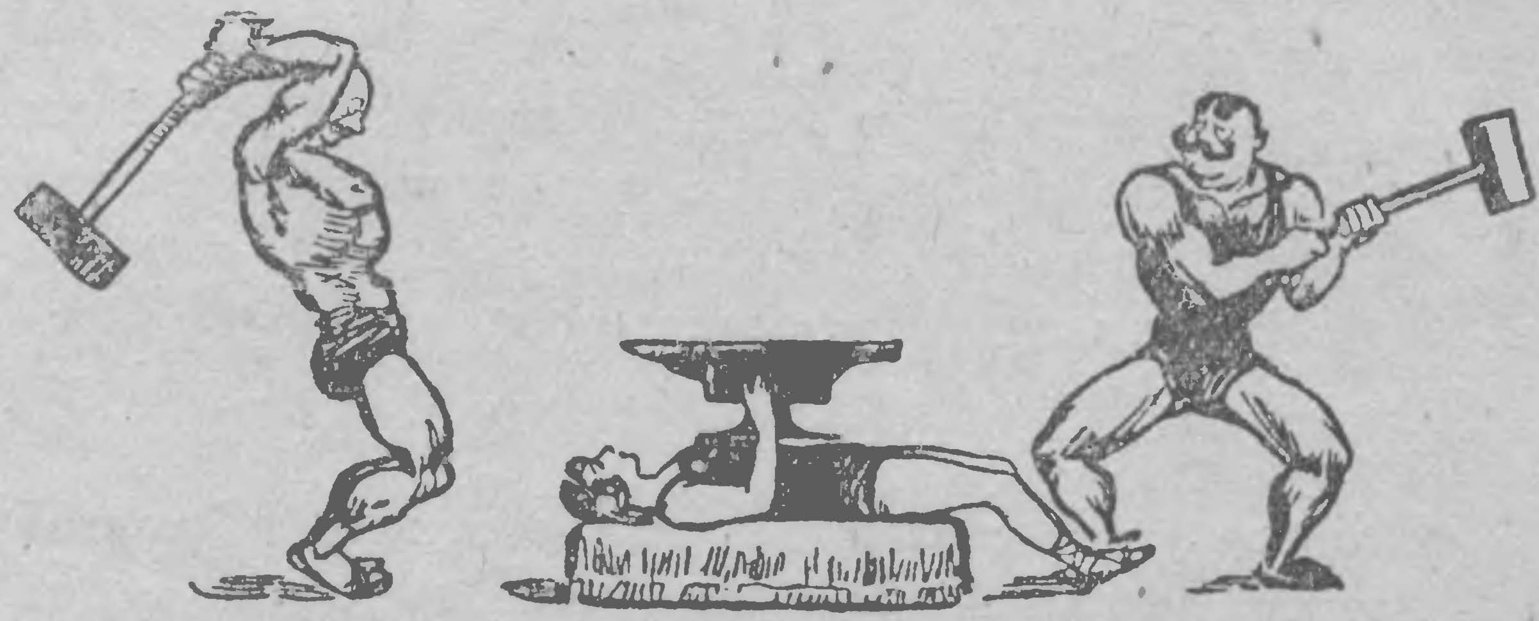
рокую долину, в которой ложе реки занимает только некоторую часть. На рис. 44 *e*, *f* и *g* развитие речной долины пошло еще дальше; на рис. 44 *g* изгиб речного ложа так велик, что образует почти петлю. Наконец, на рис. *h* вы видите, как река пробивает себе путь в месте сближения частей извилистого ложа и меняет там свое русло, оставляя в вогнутой части промытой долины так называемую «старицу», или «старочечье» — стоячую воду в покинутой части русла.

Читатель сам догадается, почему река в выработанной ею плоской долине не течет посередине или вдоль одного края, а перекидывается все время с одного края к другому — от вогнутого к ближайшему выпуклому [1].

Так управляет механика геологическими судьбами рек. Нарисованная нами картина развертывается, конечно, на протяжении огромных промежутков времени, измеряемых тысячелетиями. Однако явление, во многих подробностях сходное с этим, вы можете видеть в миниатюрном масштабе каждую весну, наблюдая за теми крошечными ручейками, которые промывает талая вода в затвердевшем снеге.



[1] Мы совершенно не касались здесь действия вращательного движения Земли, сказывающегося в том, что реки северного полушария усиленно размывают свой правый берег, а южного полушария — левый. Об этом см. мою «Занимательную астрономию», 1937, гл. I.



Глава шестая

УДАР

В ПОИСКАХ САМОГО ПОНЯТНОГО

Тот отдел механики, где говорится об ударе тел, не пользуется обычно любовью учащихся. Он усваивается медленно, а забывается быстро, оставляя по себе недобрую память, как о клубке громоздких формул. А между тем он заслуживает большого внимания. Ведь соударение тел еще не так давно — лет 50 назад — считалось единственно понятным явлением из всех физических, происходящих в мире; вернее, его признавали единственным явлением, не требующим объяснения, так как ударом двух тел стремились объяснить возникновение всех прочих явлений природы.

Еще Кювье, знаменитый натуралист XIX века, писал: «Удалившись от удара, мы не можем составить ясной идеи об отношениях между причиной и действием». Явление считалось объясненным лишь тогда, когда удавалось свести его причину к соударению молекул.

Правда, стремление объяснить мир, исходя из этого начала, не увенчалось успехом: обширный ряд явлений —

электрические, оптические, тяготение — не поддается такому объяснению. Тем не менее и теперь еще удар тел играет важную роль в объяснении явлений природы. Вспомним кинетическую теорию газов, рассматривающую обширный круг явлений как беспорядочное движение множества непрестанно соударяющихся молекул. Помимо того мы встречаемся с ударом тел на каждом шагу в повседневной жизни. Обойтись без знания этого отдела механики невозможно.

МЕХАНИКА УДАРА

Знать механику удара тел значит уметь предвидеть, какова будет скорость соударяющихся тел после их столкновения. Эта окончательная скорость зависит от того, сталкиваются ли тела неупругие (не отскакивающие), или же упругие.

В случае тел неупругих оба столкнувшихся тела приобретают после удара одинаковую скорость; величина ее получается из их масс и первоначальных скоростей по правилу смешения.

Когда смешивают 3 *кг* кофе по 8 руб. с 2 *кг* кофе по 10 руб., то цена смеси равна:

$$\frac{3 \times 8 + 2 \times 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ руб.}$$

Точно так же, когда неупругое тело, обладающее массой 3 *кг* и скоростью 8 *см/сек*, сталкивается с другим неупругим телом, масса которого 2 *кг* и скорость 10 *см/сек*, настигающим его, то окончательная скорость x каждого тела:

$$x = \frac{3 \times 8 + 2 \times 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ см.}$$

В общем виде — при соударении неупругих тел, массы которых m_1 и m_2, скорости v_1 и v_2, их окончательная скорость x после удара равна

$$x = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

Если направление скорости v_1 мы считаем положительным, то знак плюс перед скоростью х означает, что тела после удара движутся в направлении скорости v_1; знак минус указывает противоположное направление.

Вот все, что надо помнить об ударе тел неупругих. Удар упругих тел протекает сложнее: такие тела при ударе не только сжимаются в месте соприкосновения (как и тела неупругие), но и расширяются вслед за этим, восстанавливая свою первоначальную форму. И в этой второй фазе тело настигающее теряет из своей скорости еще столько же, сколько потеряло оно в первую фазу, а тело настигаемое приобретает в скорости еще столько же, сколько приобрело оно в первую фазу. Двойная потеря скорости для более быстрого тела и двойной выигрыш ее для менее быстрого — вот собственно все об упругом ударе, что надо держать в памяти. Остальное сводится к чисто математическим переделкам. Пусть скорость более быстрого тела v_1, другого v_2, а массы их m_1 и m_2. Если бы тела были неупруги, то после удара каждое из них двигалось бы со скоростью

$$x = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

Потеря скорости для первого тела равна была бы $v_1 - x$; выигрыш скорости для второго $x - v_2$. В случае же тел упругих потеря и выигрыш, мы знаем, удваиваются, т. е. равны $2\ (v_1 - x)$ и $2\ (x - v_2)$. Значит, окончательные скорости y и z после упругого удара таковы:

$$y = v_1 - 2\ (v_1 - x) = 2x - v_1$$
$$z = v_2 + 2\ (x - v_2) = 2x - v_2.$$

Остается только подставить в эти выражения вместо x его значение (см. выше).

Мы рассмотрели два крайних случая удара: тел вполне неупругих и тел вполне упругих. Возможен еще промежуточный случай: когда сталкивающиеся тела не вполне упруги, т. е. после первой фазы удара восстанавливают свою форму не полностью. К этому случаю мы еще вернемся; пока достаточно знать то, что сейчас было изложено.

Картину упругого удара мы могли бы охватить следующим кратким правилом: тела расходятся после столкновения с той же скоростью, с какой сближались до удара. Это вытекает из довольно простых соображений. Скорость сближения тел до удара равна

$$v_1 - v_2.$$

Скорость их расхождения после удара равна

$$z - y.$$

Подставив вместо z и y их выражения, получаем:

$$z - y = 2x - v_2 - (2x - v_1) = v_1 - v_2.$$

Свойство это важно не только потому, что дает наглядную картину упругого удара, но и в другом отношении. При выводе формулы мы говорили о телах «ударяемом» и «ударяющем», «настигаемом» и «настигающем», относя движение их, конечно, только к некоторому третьему телу, не участвующему в их движениях. Но в первой главе нашей книги (вспомните задачу о двух яйцах) было уже разъяснено, что между телами ударяющим и ударяемым никакой разницы нет: роли их можно обменять, ничего не изменяя в картине явления. Справедливо ли это и в рассматриваемом случае? Не дадут ли полученные ранее формулы иные результаты, если роли тел изменятся?

Легко видеть, что от такой перемены результат вычисления по формулам нисколько не изменится. Ведь при той и другой точках зрения разность скоростей тел до удара должна оставаться неизменной. Следовательно, не изменится и скорость расхождения тел после удара ($z - y = v_1 - v_2$). Иными словами, картина окончательного движения тел остается та же.

Вот несколько интересных числовых данных, относящихся к удару абсолютно упругих шаров. Два стальных шара, каждый диаметром около 7,5 *см* (т. е. примерно величиной с биллиардные), сталкиваясь со скоростью 1 *м/сек*, сдавливаются с силой 1 500 *кг*, а при скорости 2 *м/сек* — с силой 3 500 *кг*. Радиус того кружка, по которому шары при этом ударе соприкасаются, в первом случае 1,2 *мм*, во втором — 1,6 *мм*. Продолжительность удара в обоих случаях — около $\frac{1}{5000}$ секунды. Кратковременностью удара объясняется то, что материал шаров не разрушается при столь значительном давлении (15—20 тонн на $см^2$).

Впрочем, так мала продолжительность удара только при небольших размерах шаров. Расчет показывает, что для стальных шаров планетных размеров (радиус = = 10 000 *км*), соударяющихся со скоростью 1 *см/сек*, время удара должно равняться 40 часам. Круг соприкосновения имеет при этом радиус 12,5 *км*, а сила взаимного сдавливания — около 400 биллионов тонн!

ИЗУЧИТЕ СВОЙ МЯЧ

Те формулы удара тел, с которыми мы познакомились на предыдущих страницах, непосредственно на практике мало применимы. Число тел, причисляемых к «вполне неупругим» или к «вполне упругим», весьма ограниченно. Преобладающее большинство тел не принадлежит ни к тем, ни к другим: они «не вполне упруги». Возьмем мячик. Не страшась насмешки старинного баснописца, спросим себя: мячик вещь какая? Вполне упругая или не вполне упругая с точки зрения механики?

Имеется простой способ испытать мяч на упругость: уронить с некоторой высоты на твердую площадку. Вполне упругий мяч должен подскочить на ту же высоту.*

Это вытекает из формулы упругого удара:

$$y = 2x - v_1 = \frac{2\,(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2} - v_1.$$

Прилагая ее к случаю мяча, ударяющегося в неподвижную площадку, мы можем массу m_2 площадки считать бесконечно большой, скорость же ее равна нулю: $m_2 = \infty$, $v_2 = 0$. До подстановки этих значений в предыдущую формулу преобразуем ее, разделив числитель и знаменатель дроби на m_2:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{m_2} v_1 + v_2\right)}{\frac{m_1}{m_2} + 1} - v_1.$$

После подстановки получаем:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{\infty} v_1 + 0\right)}{\frac{m_1}{\infty} + m_2} - v_1.$$

Так как $\frac{m_1}{\infty} = 0$, то дробь становится равной нулю и формула получает вид:

$$y = -v_1.$$

То-есть мяч должен отскочить от площадки с той же скоростью, с какой достиг ее. Но падая с высоты H, тело приобретает скорость

$$\sqrt{2gH}, \text{ откуда } H = \frac{v^2}{2g}.$$

Подброшенное же отвесно со скоростью v, тело достигает высоты

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Значит, $h = H$: мяч должен подскочить до того уровня, с какого он упал.

Шар неупругий не подскакивает совсем (легко убедиться соответственной подстановкой в формулу).

Как же должен вести себя мяч не вполне упругий? Чтобы уяснить это, вникнем в картину упругого удара. Мяч достигает площадки; в точке соприкосновения он вдавливается, и вдавливающая сила уменьшает его скорость. До сих пор мяч ведет себя так, как вело бы себя и неупругое тело; значит, его скорость в этот момент равна x, а потеря скорости $v_1 - x$. Но вдавленное место начинает сразу же вновь выпячиваться; при этом мяч, конечно, напирает на площадку, мешающую ему выпячиваться; возникает опять сила, действующая на мяч и уменьшающая его скорость. Если шар при этом вполне восстанавливает свою прежнюю форму, т. е. проходит в обратном порядке те же этапы изменения формы, которые прошел он при сжатии, то новая потеря скорости должна равняться прежней, или $v_1 - x$, а следовательно, в общем скорость вполне упругого мяча должна уменьшиться на $2\ (v_1 - x)$ и равняться

$$v_1 - 2\ (v_1 - x) = 2x - v_1.$$

Когда мы говорим, что мяч «не вполне упруг», то мы собственно хотим сказать, что он не вполне восстанавливает свою форму после ее изменения под действием внешней силы. При восстановлении его формы действует сила, меньшая той, которая эту форму изменила, а соответственно этому потеря скорости за период восстановления меньше первоначальной; она равна не $v_1 - x$, а составляет некоторую долю ее, которую обозначим правильной дробью e

(«коэфициент восстановления»). Итак, потеря скорости при упругом ударе в первом периоде равна $v_1 - x$, во втором равна $e(v_1 - x)$. Общая потеря равна $(1 + e)(v_1 - x)$, а скорость y, остающаяся после удара, равна

$$y = v_1 - (1 + e)(v_1 - x) = (1 + e)x - ev_1.$$

Скорость же z ударяемого тела (в данном случае площадки), которое отталкивается мячом по закону противодействия, должна равняться, как легко вычислить,

$$z = (1 + e)x - ev_2.$$

Разность $z - y$ обеих скоростей равна $ev_1 - ev_2 = e(v_1 - v_2)$, откуда находим, что «коэфициент восстановления»

$$e = \frac{z - y}{v_1 - v_2}.$$

Для мяча, ударяющегося о неподвижную площадку, $z = (1 + e)x - ex_2 = 0$, $v_2 = 0$. Следовательно,

$$e = \frac{y}{v_1}.$$

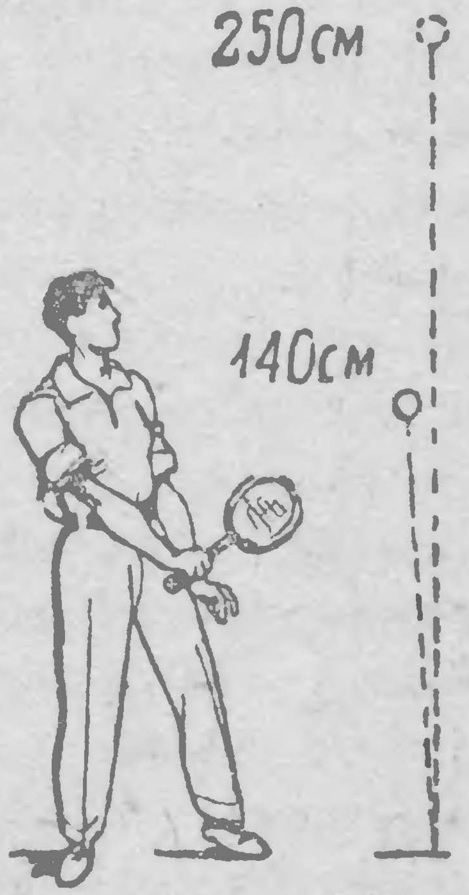


Рис. 45. Хороший мяч для тенниса должен подпрыгнуть примерно на 140 *см*, если его уронить с высоты 250 *см*.

Но y — скорость подскакивающего шара — равна $\sqrt{2gh}$, где h — высота, на которую он подскакивает. $v_1 = \sqrt{2gH}$, где H — высота, с которой мяч упал. Значит,

$$e = \sqrt{\frac{2gh}{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}.$$

Итак, мы нашли способ определять «коэфициент восстановления» (e) мяча, характеризующий степень отступления его свойств от вполне упругих: надо измерить высоту, с которой его роняют, и высоту, на которую он подскакивает: квадратный корень из отношения этих величин и будет искомый коэфициент.

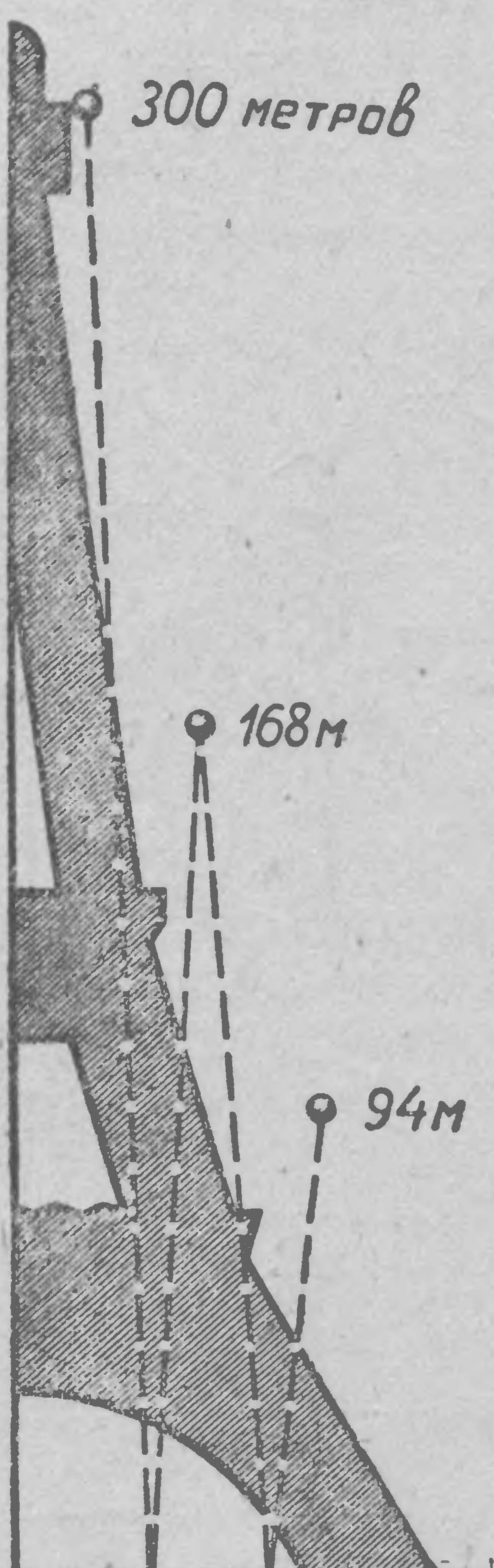


Рис. 46. Как высоко подпрыгнул бы мяч, уроненный с Эйфелевой башни.

По спортивным правилам, хороший теннисный мяч должен при падении с высоты 250 *см* подскакивать на высоту 127—152 *см*. Значит, коэфициент восстановления для теннисного мяча должен заключаться в пределах

$$\text{от} \sqrt{\frac{127}{250}} \text{ до } \sqrt{\frac{152}{250}},$$

т. е. от 0,71 до 0,78.

Остановимся на средней величине 0,75, т е., выражаясь вольно, возьмем мяч «упругий на 75%» и проделаем некоторые интересные для спортсменов расчеты.

Первая задача: насколько подскочит мяч во второй, в третий и последующие разы, если его уронить с высоты H?

В первый раз мяч подскочит, мы знаем, на высоту, определяемую из формулы

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}}.$$

Для $e = 0{,}75$ и $H = 250$ *см* имеем:

$$\sqrt{\frac{h}{250}} = 0{,}75,$$

откуда $h = 140$ *см*.

Во второй раз, т. е. после падения с высоты $h = 140$ *см*, мяч подскочит на высоту h_1, причем

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_1}{140}},$$

откуда $h_1 = 78$ *см*.

Высоту h_2 третьего подъема мяча найдем из уравнения

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{78}},$$

откуда $h_2 = 44$ *см*.

Дальнейшие расчеты ведутся таким же путем.

Уроненный с высоты Эйфелевой башни ($H = 300$ *м*) такой мяч подскочил бы в первый раз на 168 *м*, во второй — на 94 *м* и т. д., если не принимать в расчет сопротивления воздуха, которое в этом случае должно быть велико (из-за значительной скорости).

Вторая задача: сколько всего времени мяч, уроненный с высоты H, будет подскакивать?

Мы знаем, что

$$H = \frac{gT^2}{2}; \quad h = \frac{gt^2}{2}; \quad h_1 = \frac{gt_1^2}{2} \text{ и т. д.}$$

И следовательно,

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}} \text{ и т. д.}$$

Продолжительность подскакивания равна

$$T + 2t + 2t_1 + 2t_2 + \text{ и т. д.},$$

т. е.

$$\sqrt{\frac{2H}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h_1}{g}} + \text{ и т. д.}$$

После некоторых преобразований, которые читатель-математик легко проделает самостоятельно, получаем для искомой суммы выражение:

$$\sqrt{\frac{2H}{g}}\left(\frac{2}{1-e}-1\right).$$

Подставляя: $H=250$ *см*, $g=980$ *см/сек*^{2}. $e=0{,}75$, имеем общую продолжительность подскакивания равной 5 сек.: мяч будет подскакивать в течение 5 сек.

Если бы его уронить с высоты Эйфелевой башни, подскакивание длилось бы (при отсутствии сопротивления атмосферы) около минуты, точнее — 54 сек., если только мяч уцелеет при ударе.

При падении мяча с высоты нескольких метров скорости не велики, а потому влияние сопротивления воздуха незначительно. Был сделан такой опыт: мяч, коэфициент восстановления которого 0,76, уронили с высоты 250 *см*. При отсутствии атмосферы он должен был бы подскочить во второй раз на 84 *см*; в действительности же он подскочил на 83 *см*; как видим, сопротивление воздуха почти не сказалось.

НА КРОКЕТНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Крокетный шар налетает на неподвижный, нанося ему удар, который в механике называется «прямым» и «центральным». Что произойдет с обоими шарами после удара?

Оба крокетных шара имеют равную массу. Если бы они были в п о л н е н е у п р у г и, то скорости их после удара были бы одинаковы; они равнялись бы половине скорости ударяющего шара. Это вытекает из формулы:

$$x=\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2},$$

в которой $m_1=m_2$ и $v_2=0$.

Напротив, если бы шары были вполне упруги, то простое вычисление (выполнение которого предоставляем читателю) показало бы, что они **обменялись бы скоростями**: налетевший шар остановился бы после удара на месте, а шар, прежде неподвижный, двигался бы в направлении удара со скоростью ударившего шара. Так и происходит при ударе биллиардных шаров (из слоновой кости).

Но крокетные шары не принадлежат ни к тому, ни к другому роду тел: они **не вполне упруги**. Поэтому результат удара не похож на сейчас указанные. Оба шара продолжают после удара двигаться, но не с одинаковой скоростью: ударивший шар отстает от крокированного. Обратимся за подробностями к формулам удара тел.

Пусть «коэфициент восстановления» (как его определить, читателю известно из предыдущего) равен e. В предыдущей статье мы нашли для скоростей y и z обоих шаров после удара следующие выражения:

$$y = (1 + e)\, x - ev_1; \quad z = (1 + e)\, x - ev_2.$$

Здесь, как и в прежних формулах,

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

В случае крокетных шаров $m_1 = m_2$ и $v_2 = 0$. Подставив, имеем:

$$x = \frac{v_1}{2}; \; y = \frac{v_1}{2}(1 - e); \; z = \frac{v_1}{2}(1 + e).$$

Кроме того, легко убедиться, что

$$y + z = v_1; \quad z - y = ev_1.$$

Теперь мы можем в точности предсказать судьбу ударяющихся крокетных шаров: скорость ударившего шара распределяется между обоими шарами так, что крокированный шар движется быстрее ударившего на долю e первоначальной скорости ударившего шара.

Возьмем пример. Пусть $e = 0{,}75$. В таком случае ударенный шар получит $^7/_8$ первоначальной скорости крокировавшего шара, а этот последний будет двигаться за ним, сохранив только $^1/_8$ первоначальной скорости.

„ОТ СКОРОСТИ СИЛА"

Под таким заглавием в «Первой книге для чтения» Л. Н. Толстого был помещен следующий рассказ:

«Один раз машина (поезд) ехала очень скоро по железной дороге. А на самой дороге, на переезде, стояла лошадь с тяжелым возом. Мужик гнал лошадь через дорогу, лошадь не могла сдвинуть воза, потому что колесо соскочило. Кондуктор закричал машинисту: «Держи» — но машинист не послушался. Он смекнул, что мужик не может ни согнать лошадь с телегой, ни своротить ее, и что машину сразу остановить нельзя. Он не стал останавливать, а самым скорым ходом пустил машину и во весь дух налетел на телегу. Мужик отбежал от телеги, а машина, как щепку, сбросила с дороги телегу и лошадь, а сама не тряхнулась, пробежала дальше. Тогда машинист сказал кондуктору: «Теперь мы только убили одну лошадь и сломали телегу; а если бы я тебя послушал, мы сами бы убились и перебили бы всех пассажиров. На скором ходу мы сбросили телегу и не слыхали толчка, а на тихом ходу нас бы выбросило из рельсов».

Можно ли это происшествие объяснить с точки зрения механики? Мы имеем здесь случай удара не вполне упругих тел, причем тело ударяемое (телега) было до удара неподвижно. Обозначив массу и скорость поезда через m_1 и v_1 массу и скорость телеги через m_2 и v_2 ($=0$), применяем уже известные нам формулы:

$$y=(1+e)\,x-ev_1;\quad z=(1+e)\,x-ev_2,$$

$$x=\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}.$$

Разделив в последнем выражении числитель и знаменатель дроби на m_1, получим:

$$x = \frac{v_1 + \frac{m_2}{m_1} v_2}{1 + \frac{m_2}{m_1}}.$$

Но отношение $\frac{m_2}{m_1}$ массы телеги к массе поезда, ничтожно; приравнивая его нулю, имеем

$$x \approx v_1.$$

Значит, поезд после столкновения будет продолжать путь с прежней скоростью; пассажиры не ощутят никакого толчка (изменения скорости).

А что будет с телегой? Ее скорость после удара, $z = (1 + e)\ x = (1 + e)\ v_1$, превышает скорость поезда на ev_1. Чем больше была скорость v_1 поезда до удара, тем быстрее будет телега после удара удаляться от мчащегося поезда. Это в данном случае имеет существенное значение; для избежания катастрофы необходимо преодолеть т р е н и е телеги; при недостаточной энергии удара она могла бы служить серьезной помехой, оставаясь на рельсах.

Итак, разгоняя поезд, машинист поступил правильно: благодаря этому поезд, не претерпев сам сотрясения, устранил телегу со своего пути. Нужно заметить, что рассказ Толстого относился к сравнительно тихоходным поездам его времени.

ЧЕЛОВЕК-НАКОВАЛЬНЯ

Этот цирковой номер производит сильное впечатление даже на подготовленного зрителя. Артист ложится на землю; на грудь его ставят тяжелую наковальню, и двое силачей со всего размаха ударяют по ней увесистыми молотами. Невольно удивляешься, как может живой человек выдерживать без вреда для себя такое сотрясение?

З а к о н ы у д а р а упругих тел говорят нам, однако, что чем наковальня тяжелее по сравнению с молотом, тем меньшую скорость получает она при ударе, т. е. тем сотрясения менее ощутительны.

Вспомним формулу для скорости ударяемого тела при упругом ударе

$$z = 2x - v_2 = \frac{2(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2} - v_2.$$

Здесь m_1 — масса молота, m_2 — масса наковальни, v_1 и v_2 — их скорости до удара. Мы знаем прежде всего, что $v_2 = 0$, так как наковальня до удара была неподвижна. Значит, формула наша получает вид:

$$z = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{2v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$$

(мы разделили числитель и знаменатель на m_2). Если масса m_2 наковальни весьма значительна по сравнению с массой m_1 молота, то дробь $\frac{m_1}{m_2}$ очень мала, и ею можно в знаменателе пренебречь. Тогда скорость наковальни после удара

$$z = 2v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2},$$

т. е. составляет ничтожную часть скорости v_1 молота [1].

Для наковальни, которая тяжелее молота, скажем, в 100 раз, скорость в 50 раз меньше скорости молота

$$z = 2v_1 \cdot \frac{1}{100} = \frac{1}{50}\, v_1.$$

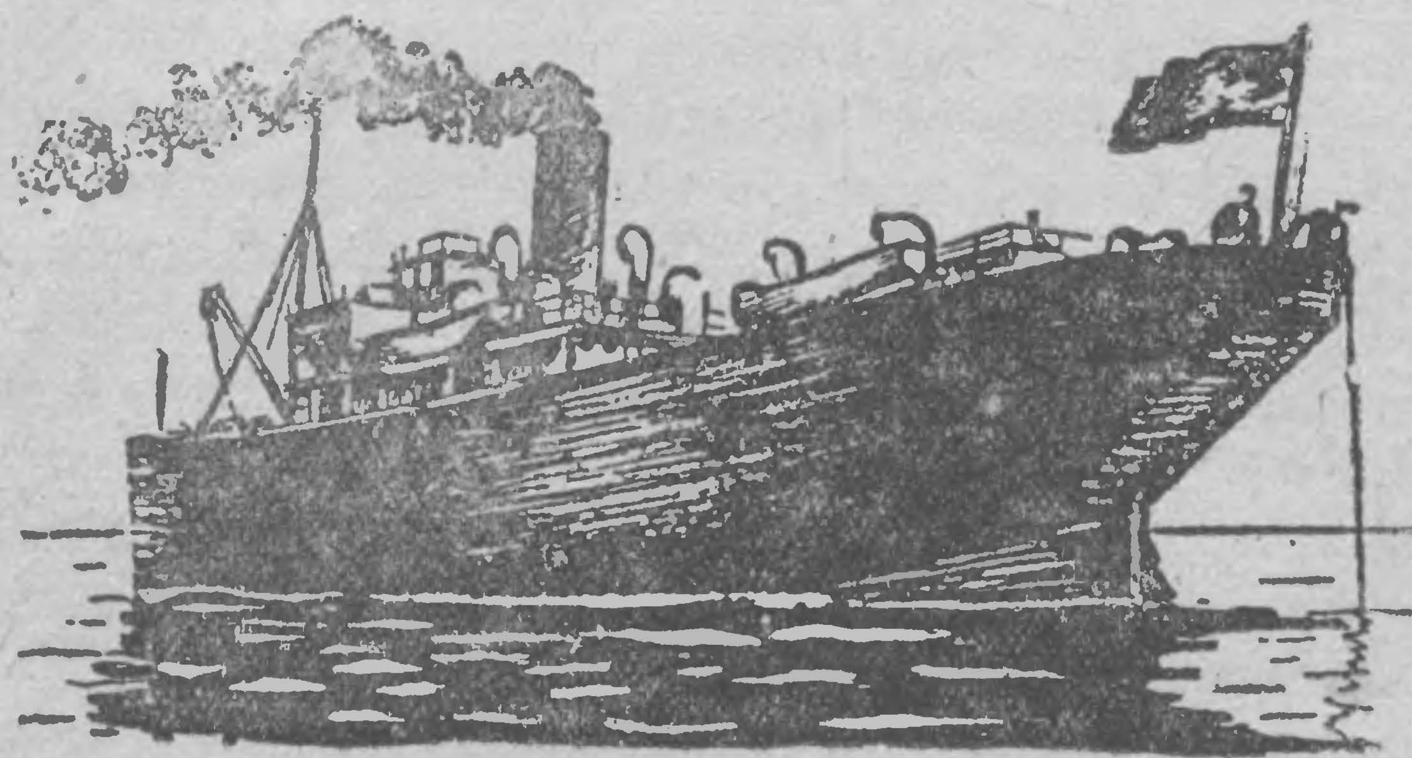
Кузнецы хорошо знают из практики, что удар легкого молота не передается в глубину. Теперь понятно, почему

---

[1] Мы приняли и молот и наковальню за тела вполне упругие. Читатель может убедиться подобным же расчетом, что результат мало изменится, если считать оба тела не вполне упругими.

артисту, лежащему под наковальней, выгоднее, чтобы она была возможно тяжелее. Вся трудность лишь в том, чтобы безнаказанно удерживать на груди такой груз. Это возможно, если основанию наковальни придать такую форму, чтобы оно плотно прилегало к телу на большом пространстве, а не соприкасалось только в нескольких маленьких участках. Тогда вес наковальни распределяется на большую поверхность, и на каждый квадратный сантиметр приходится не столь уж значительная нагрузка. Между основанием наковальни и телом человека помещается мягкая прокладка.

Обманывать публику на весе наковальни артисту нет никакого смысла; но есть расчет обмануть на весе молота; возможно поэтому, что цирковые молоты не так тяжелы, как кажутся. Если молот полый, то сила его удара не становится в глазах зрителя менее сокрушительной, сотрясения же наковальни ослабевают пропорционально уменьшению его массы.



Глава седьмая

КОЕ-ЧТО О ПРОЧНОСТИ

ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОКЕАНСКИХ ГЛУБИН

Средняя глубина океана около 4 *км*, но в отдельных местах дно лежит ниже раза в два и более. Наибольшая глубина, как уже было указано, 11 *км*. Чтобы измерить подобную глубину, нужно спустить в него проволоку длиной свыше 10 *км*. Но такая проволока имеет значительный вес; не разорвется ли она от собственного веса?

Вопрос не праздный; расчет подтверждает его уместность. Возьмем медную проволоку в 11 *км* длины; обозначим ее диаметр буквой D (в частях сантиметра). Объем такой проволоки равен $= \frac{1}{4}\pi D^2 \times 1\,100\,000$ *см*³. А так как 1 *см*³ меди весит в в о д е круглым числом 8 *г*, то наша проволока должна представлять собой в воде груз

$$\frac{1}{4}\pi D^2 \times 1\,100\,000 \times 8 = 6\,900\,000\, D^2 \ г,$$

При толщине проволоки, например, 3 *мм* ($D = 0,3$ *см*) это составит груз в 620 000 *г*, т. е. 620 *кг*. Удержит ли такой толщины проволока груз около $^3/_5$ тонны? Здесь мы должны немного отойти в сторону и посвятить страницу вопросу о силах, разрывающих проволоки и стержни.

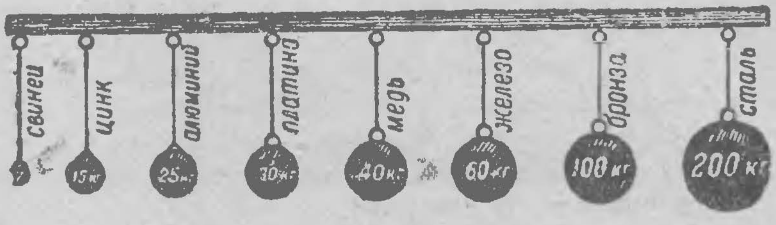


Рис. 47. Какими грузами разрываются проволоки из разных металлов? (сечение—1 $мм^2$)

Отрасль механики, называемая «сопротивлением материалов», устанавливает, что сила, необходимая для разрыва стержня или проволоки, зависит только от их материала и от величины поперечного сечения. Зависимость от сечения проста: во сколько раз увеличивается площадь сечения, во столько раз возрастает необходимая для разрыва сила. Что же касается материала, то опытом найдено, какая сила нужна для разрыва стержня из данного материала, если сечение стержня 1 $мм^2$. В технических справочниках обычно помещается таблица величин этой силы— таблица сопротивления разрыву. Она представлена наглядно на рис. 47. Рассматривая его, вы видите, что, например, для разрыва свинцовой проволоки (в 1 $мм^2$ сечением) нужна сила в 2 *кг*, медной — в 40 *кг*, бронзовой — в 100 *кг* и т. д.

В технике, однако, никогда не допускают, чтобы стержни и тяжи находились под действием таких усилий. Подобная конструкция была бы ненадежна. Достаточно малейшего, незаметного для глаза изъяна в материале, либо же ничтожной перегрузки вследствие сотрясения или изменения температуры, — и стержни лопаются, тяжи разрываются, сооружение рушится. Необходим «запас прочности», т. е. нужно, чтобы действующие силы составляли только некоторую долю разрывающей нагрузки — четвертую, шестую, восьмую, смотря по материалу и условиям его службы.

Вернемся теперь к начатому расчету. Какая сила достаточна для разрыва медной проволоки, диаметр которой D *см*? Площадь ее сечения равна $\frac{1}{4}\pi D^2$ *см*^{2} или $25\pi D^2$ *мм*^{2}. Справившись в нашей иллюстрированной табличке, находим, что при сечении 1 *мм*^{2} медная проволока разрывается силой 40 *кг*. Значит, для разрыва нашей проволоки достаточна сила в $40 \times 25\pi D^2 = 1000\ \pi D^2$ *кг* $= 3140 D^2$.

Сама же проволока весит, как мы уже вычислили, $6900\ D^2$ *кг* — в $2\frac{1}{2}$ раза больше. Вы видите, что медная проволока не годится для измерения океанских глубин, даже если и не брать для нее никакого запаса прочности: при длине 5 *км* она разрывается от собственного веса.

САМЫЕ ДЛИННЫЕ ОТВЕСЫ

Вообще для всякой проволоки имеется такая предельная длина, при которой она разрывается от собственного веса. Отвес не может быть как угодно длинен: существует длина, которую он не может превосходить. Увеличение толщины проволоки здесь не поможет: с удвоением диаметра проволока может выдержать в 4 раза больший груз, но и вес ее возрастет в 4 раза. Предельная длина зависит не от толщины проволоки (толщина безразлична), а от материала: для железа она одна, для меди другая, для свинца — третья. Вычисление этой предельной длины весьма несложно; после расчета, выполненного в предыдущей статье, читатель поймет его без длинных пояснений. Если площадь поперечного сечения проволоки s $см^2$, длина L *км*, а вес 1 $см^3$ ее вещества ρ *г*, то вся проволока весит $100\,000\ sL\rho$ *г*; выдержать же нагрузку она может в $1\,000\ Q \times 100s = 100\,000\ Qs$ *г*, где Q — разрывающая нагрузка на 1 $мм^2$ (в килограммах). Значит, в предельном случае

$$100\,000\ Qs = 100\,000 sL\rho,$$

откуда предельная длина в километрах

$$L = \frac{Q}{\rho}.$$

По этой простой формуле легко вычислить предельную длину для проволоки или нити из любого материала. Для меди мы нашли раньше предельную длину в в о д е; вне воды она еще меньше и равна $\frac{Q}{\rho} = \frac{40}{9} = 4{,}4$ *км*.

А вот предельная длина для проволок из некоторых других материалов:

для свинца	200 *м*
„ цинка	2,1 *км*
„ железа	7,5 „
„ стали	25 „

Но технически нельзя пользоваться отвесами такой длины; это значило бы напрягать их до недопустимой степени. Необходимо нагружать их лишь до известной части разрывающей нагрузки: для железа и стали, например до ¼. Значит, технически можно пользоваться железным отвесом не длиннее 2 *км*, а стальным — не длиннее 6¼ *км*.

В случае погружения отвесов в воду, крайняя длина их — для железа и стали — может быть увеличена на $\frac{1}{8}$ долю. Но и этого недостаточно для достижения дна океана в самых глубоких местах. Чтобы делать подобные промеры, приходится пользоваться особо прочными сортами стали[1].

САМЫЙ КРЕПКИЙ МАТЕРИАЛ

К числу материалов, самых прочных на разрыв, принадлежит хромоникелевая сталь: чтобы разорвать проволоку из такой стали в 1 *мм*^{2} сечением, надо приложить силу в 250 *кг*.

Вы лучше поймете, что это значит, если взглянете на прилагаемый рис. 48: тонкая стальная проволока (ее диаметр чуть больше 1 *мм*) удерживает тяжелого борова. Из такой стали и изготовляется лот-линь океанского глубомера. Так как 1 *см*^{3} стали весит в воде 7 *г*, а допускаемая нагрузка на 1 *мм*^{2} составляет в этом случае $\frac{250}{4} = 62$ *кг*, то крайняя («критическая») длина отвеса из этой стали равна

$$L = \frac{62}{7} = 8{,}8 \text{ км}.$$

Но глубочайшее место океана лежит еще ниже. Приходится поэтому брать меньший запас прочности и, следовательно, очень осторожно обращаться с лот-линем, чтобы достичь самых глубоких мест океанского дна.

Те же затруднения возникают и при «зондировании»

---

[1] В последнее время для измерения морских глубин обходятся совсем без проволочного лота: пользуются отражением звука от дна водоема. («Эхо-лот».) См. об этом в «Занимательной физике» Я. И. Перельмана, кн. 1-я, гл. X.

воздушного океана при помощи змеев с самопишущими приборами. В обсерватории под Берлином запускают змея на 9 *км*, причем проволоке приходится выдерживать натяжение не только от собственного веса, но и от давления ветра на нее и на змей (размеры змея 2×2 *м*).

ЧТО КРЕПЧЕ ВОЛОСА?

С первого взгляда кажется, что человеческий волос может поспорить в крепости разве лишь с паутинной ниткой. Это не так; волос крепче иного металла! В самом деле, человеческий волос выдерживает груз до 100 *г* — при ничтожной толщине в 0,05 *мм*. Рассчитаем, сколько это составляет на 1 *мм*^{2}. Кружок, поперечник которого 0,05 *мм*, имеет площадь

$$\frac{1}{4} \times 3{,}14 \times 0{,}05^2 = 0{,}002 \text{ мм}^2,$$

т. е. $\frac{1}{500}$ *мм*^{2}. Значит, груз в 100 *г* приходится на площадь в 500-ю долю *мм*^{2}; на целый *мм*^{2} придется 50 000 *г* или 50 *кг*. Бросив взгляд на нарисованную табличку прочности (рис. 47), вы убедитесь, что человеческий волос по крепости должен быть поставлен между медью и железом . . .

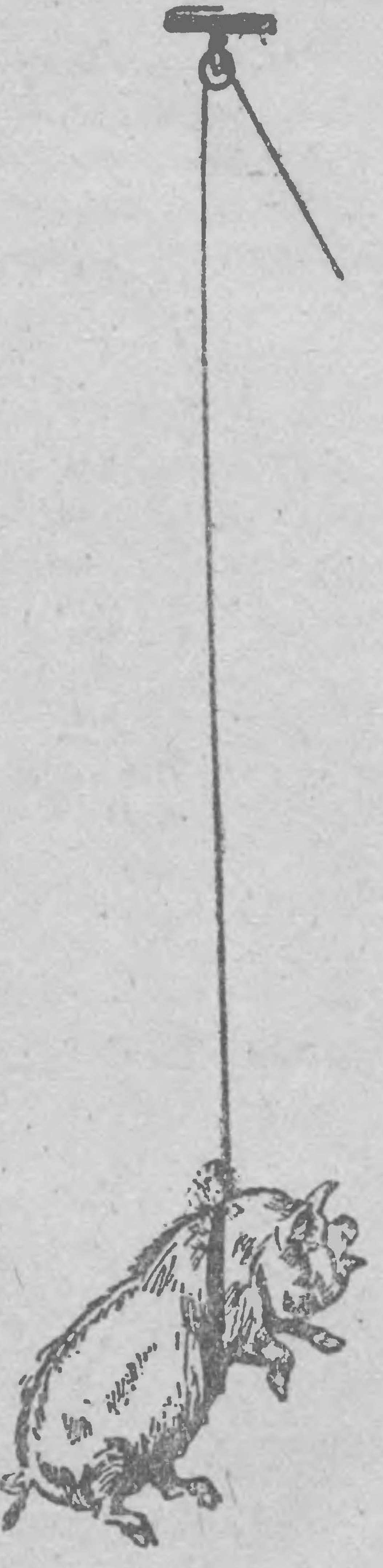


Рис. 48. Проволока из хромоникелевой стали выдерживает нагрузку 250 *кг* на *мм*^{2}.

Итак, волос крепче свинца, цинка, алюминия, платины, меди и уступает только железу, бронзе и стали!

Недаром, — если верить автору романа «Саламбо»,—древние карфагеняне считали женские косы лучшим материалом для тяжей своих метательных машин.

Вас не должен поэтому удивлять рис. 49, изображающий железнодорожную платформу и два грузовых автомобиля, подвешенные на женской косе: легко подсчитать, что коса из 200 000 волос может удержать груз в 20 тонн.

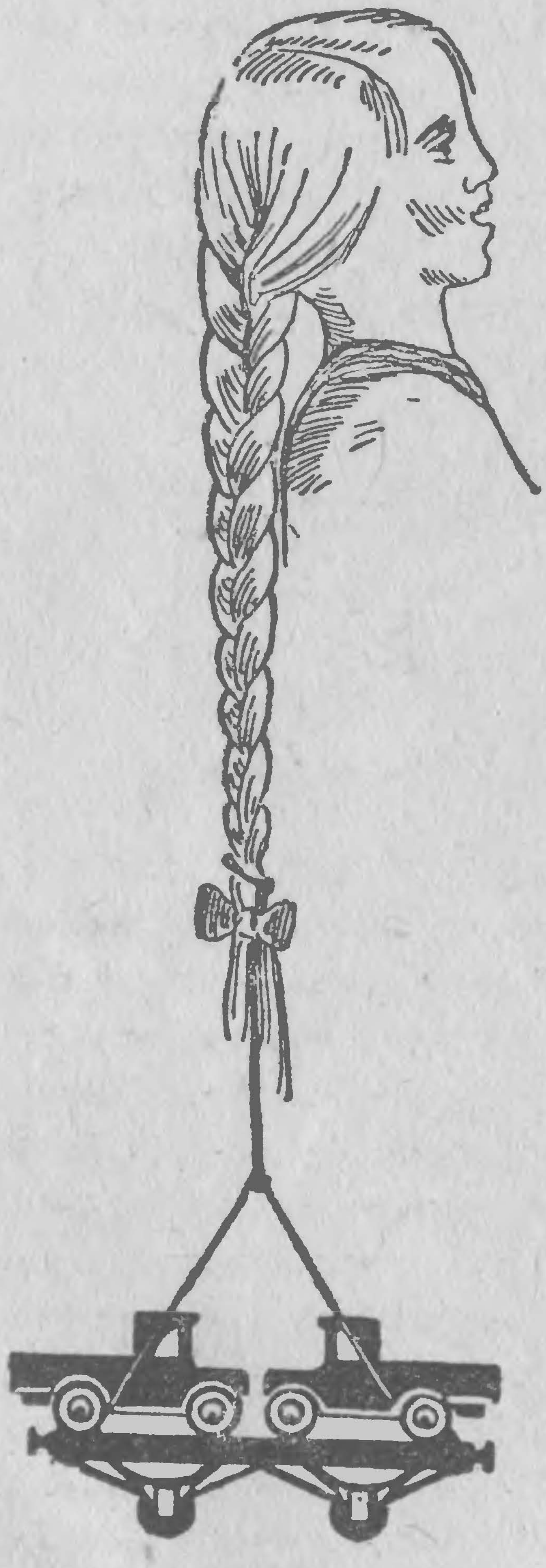


Рис. 49. Какой груз может выдержать женская коса?

ПОЧЕМУ ВЕЛОСИПЕДНАЯ РАМА ДЕЛАЕТСЯ ИЗ ТРУБОК?

Какое преимущество в прочности имеет трубка перед сплошным стержнем, если кольцевое сечение трубки равно по площади сечению стержня? Никакого, — пока речь идет о сопротивлении р а з р ы в у или с ж а т и ю: трубка и стержень разрываются и раздробляются одинаковой силой. Но в случае сопротивления и з г и б а ю щ и м усилиям разница между ними огромная: согнуть стержень значительно легче, чем согнуть трубку с равной площадью кольцевого сечения.

Об этом писал в красноречивых выражениях еще Галилей, основатель науки о прочности. Читатель не упрекнет меня в излишнем пристрастии к замечательному ученому, если я еще раз приведу цитату из его сочинений: «Мне хотелось бы, — писал он в своих «Беседах и математических доказательствах, касающихся двух новых отраслей науки», — прибавить несколько замечаний относительно сопротивления твердых тел, полых или пустых внутри, которыми как мастерство (техника), так и природа пользуются на тысячи ладов. В них без возрастания веса достигается возрастание прочности в весьма большой степени, как легко можно видеть на костях птиц и на тростнике, которые при большой легкости отличаются и большой сопротивляемостью изгибу и излому. Если бы соломинка, несущая колос, превышающий по весу весь стебель, была при том же количестве вещества сплошной и массивной, то она была бы значительно менее прочной на изгиб и на излом. Было замечено на деле и подтверждено опытом, что палка пустая внутри, а также деревянная и металлическая труба, крепче, чем массивное тело той же длины и равного веса, которое неизбежно является более тонким. Мастерство нашло применение этому наблюдению при изготовлении копий, делаемых пустыми внутри для достижения прочности и вместе с тем легкости».

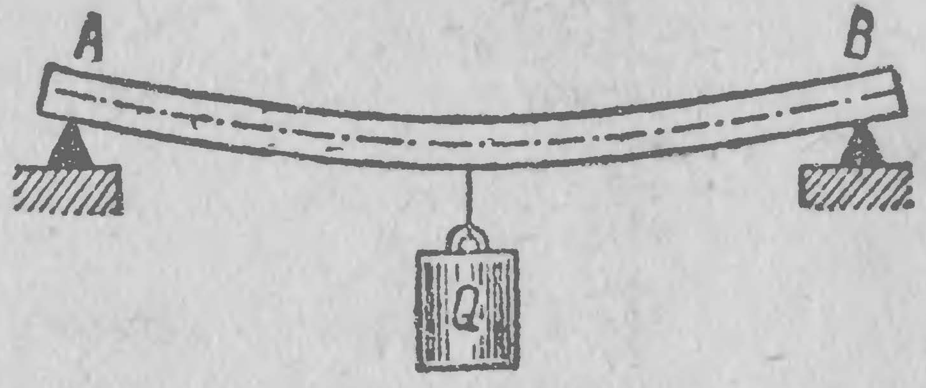


Рис. 50. Прогиб бруса.

Мы поймем, почему это, если рассмотрим поближе те напряжения, какие возникают в брусе при сгибании. Пусть в середине стержня AB (рис. 50), подпертого на концах, действует груз Q. Под влиянием груза стержень прогибается вниз. Что при этом происходит? Верхние слои бруса стягиваются; нижние, напротив, растягиваются, а некоторый средний слой («нейтральный») не будет ни сжиматься, ни растягиваться. В растянутой части бруса возникают упругие силы, противодействующие растяжению; в сжатой — силы, сопротивляющиеся сжатию. Те и другие стремятся выпрямить брус, и это со-

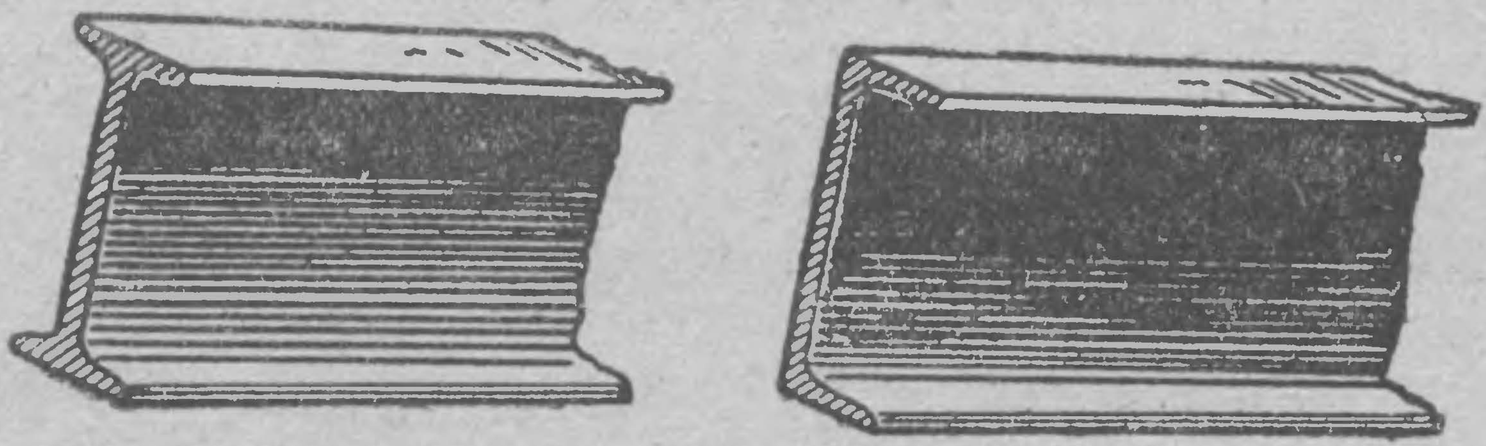


Рис. 51. Двутавровая (налево) и коробчатая балки.

противление изгибу растет по мере прогибания бруса (если не превзойден так называемый «предел упругости»), пока не достигнут такого напряжения, которого груз Q преодолеть не может: сгибание останавливается.

Вы видите, что наибольшее противодействие сгибанию оказывают в этом случае самый верхний и самый нижний слои бруса: средние части тем меньше участвуют в этом, чем ближе они к нейтральному слою. Сделать из этого вывод предоставим специалисту:

«Так как материал, прилегающий к нейтральной оси слабо участвует в сопротивлении изгибу, то выгодно сосредоточить больше материала у поверхности, удалив его из средней части. Такое целесообразное распределение материала осуществлено в железных балках (рис. 51). На том же основании при равной площади кольцевое сечение выгоднее сплошного». (О. А. Ривош, «Сопротивление материалов».)

Теперь преимущество трубок перед сплошным стержнем понятно читателю. Добавлю числовой пример. Пусть имеются две круглых балки одинаковой длины; сплошная и трубчатая, причем площадь кольцевого сечения трубчатой балки та же, что и у сплошной. Вес обеих балок, конечно, одинаков. Но разница в сопротивлении изгибу огромная: расчет показывает, что трубчатая балка[1] прочнее (на изгиб) на 112%, т. е. более чем вдвое.

ПРИТЧА О СЕМИ ПРУТЬЯХ

> «Товарищи, вспомните веник: раздергай — и весь по прутику ломай, а свяжи, попробуй-ка переломить».
>
> *Серафимович* (Среди ночи).

Всем известна старинная притча о семи прутьях. Чтобы убедить сыновей жить дружно, отец предложил им переломить пучок из семи прутьев. Сыновья пытались это сделать, но безуспешно. Тогда отец, взяв у них пучок, развязал его и легко переломил каждый прут в отдельности. Смысл притчи станет для нас вполне ясен только тогда, когда рассмотрим ее с точки зрения механики, именно — учения о прочности.

Рис. 52. Стрела (x) прогиба.

Величина изгиба стержня измеряется в механике так называемой «стрелой прогиба» x (рис. 52). Чем стрела прогиба в данном брусе больше, тем ближе момент излома. Величина же стрелы прогиба выражается следующей формулой:

$$\text{стрела прогиба } x = \frac{1}{12} \times \frac{Pl^3}{\pi k r^4},$$

---

[1] В случае, когда диаметр просвета равен диаметру сплошной балки.

в которой: P — сила, действующая на стержень; l — длина стержня: $\pi = 3,14\ldots$; k — число, характеризующее упругие свойства материала стержня; r — радиус круглого стержня.

Применим формулу к пучку прутьев. Семь его прутьев располагались, вероятнее всего, так, как показано на концовке этой главы, где изображено сечение пучка. Рассматривать подобный пучок как сплошной стержень (для чего он должен быть крепко перевязан) можно только с приближением. Но мы здесь и не ищем строго точного решения. Диаметр связанного пучка, как легко видеть из рисунка, раза в три больше диаметра отдельного прута. Покажем, что согнуть (а значит — и сломать) отдельный прут во много раз легче, чем переломить весь пучок. Если в обоих случаях хотят получить одинаковую стрелу прогиба, то для прута надо затратить силу p, а для всего пучка — силу P. Соотношение между p и P вытекает из уравнения

$$\frac{1}{12} \times \frac{pl^3}{\pi k r^4} = \frac{1}{12} \times \frac{Pl^3}{\pi k (3r)^4},$$

откуда

$$p = \frac{P}{81}.$$

Мы видим, что отцу пришлось прилагать, хотя и семикратно, зато в 80 раз меньшую силу, чем сыновьям.

Глава восьмая

РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

ЧЕГО МНОГИЕ НЕ ЗНАЮТ ОБ ЕДИНИЦЕ РАБОТЫ

— Что такое килограммометр?

— Работа поднятия одного килограмма на высоту одного метра, — отвечают обычно.

Такое определение единицы работы многие считают исчерпывающим, особенно если прибавить к нему, что поднятие происходит на земной поверхности. Если и вы удовлетворяетесь приведенным определением, то вам полезно будет разобраться в следующей задаче, лет тридцать назад предложенной знаменитым физиком проф. О. Д. Хвольсоном в одном математическом журнале.

«Из вертикально поставленной пушки длиною 1 *м* вылетает ядро весом 1 *кг*. Пороховые газы действуют всего на расстоянии 1 *м*. Так как на всем остальном пути ядра давление газов равно нулю, то они, следовательно, подняли 1 *кг* на высоту одного метра, т. е. совершили работу всего в 1 килограммометр. Неужели их работа столь мала?»

Будь это так, можно было бы обходиться без пороха, метая ядра силой человеческих рук. Очевидно, при подобном расчете делается грубая ошибка.

Какая?

Ошибка та, что, учитывая выполненную работу, мы приняли во внимание лишь небольшую ее долю и пренебрегли самой главной частью. Мы не учли того, что в конце своего пути по каналу пушки снаряд обладает скоростью, которой у него не было до выстрела. Работа пороховых газов состояла, значит, не в одном лишь поднятии ядра на высоту 1 *м*, но и в сообщении ему значительной скорости. Эту неучтенную долю работы легко определить, зная скорость ядра. Если она равна 600 *м/сек*, т. е. 60 000 *см/сек*, то при массе ядра 1 *кг* ($=1000$ *г*) кинетическая его энергия составляет:

$$\frac{mv^2}{2}=\frac{1\,000\times 60\,000^2}{2}=18\times 10^{11} \text{ эргов.}$$

Эрг — это дино-сантиметр (работа дины на пути в 1 *см*). Так как 1 килограммометр содержит $1\,000\,000\times 100 = 10^8$ дино-сантиметров, то запас энергии движения ядра равен:

$$18\times 10^{11} : 10^8 = 18\,000 \text{ кгм.}$$

Вот какая значительная часть работы осталась неучтенной только из-за неточности определения килограммометра!

Теперь становится очевидным, как надо это определение пополнить:

к и л о г р а м м о м е т р   е с т ь   р а б о т а   п о д н я т и я   н а   з е м н о й   п о в е р х н о с т и   п е р в о н а ч а л ь н о   н е п о д в и ж н о г о   г р у з а   в 1 *кг* н а   в ы с о т у 1 *м*, п р и   у с л о в и и,   ч т о   в   к о н ц е   п о д н я т и я   с к о р о с т ь   г р у з а   р а в н а   н у л ю.

КАК ПРОИЗВЕСТИ КИЛОГРАММОМЕТР РАБОТЫ?

Никаких трудностей, казалось бы, тут нет: взять гирю в 1 *кг* и поднять на 1 *м*. Однако с какой силой надо поднимать гирю? Силой в 1 *кг* ее не поднять. Нужна сила больше килограмма: избыток этой силы над весом гири и явится движущим усилием. Но непрерывно действующая сила должна сообщить поднимаемому грузу ускорение; поэтому гиря наша к концу поднятия будет обладать некоторой скоростью, не равной нулю, — а это значит, что выполнена работа не в 1 килограммометр, а больше.

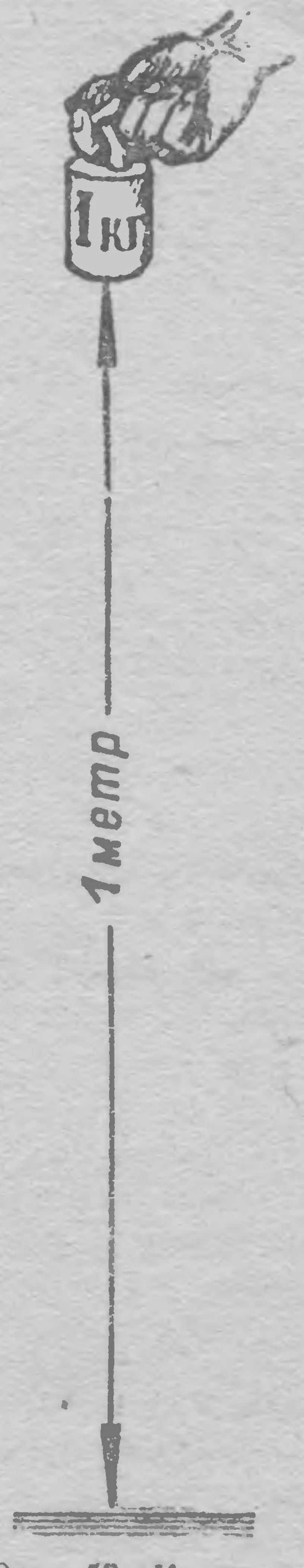


Рис. 58. Как выполнить работу ровно в 1 килограммометр?

Как же поступить, чтобы поднятием килограммовой гири на 1 *м* выполнить ровно килограммометр работы? Придется поднимать гирю очень обдуманно. В начале поднятия надо давить на гирю снизу с силой больше 1 *кг*. Сообщив этим гире некоторую скорость по направлению вверх, следует прекратить давление руки на гирю и предоставить ей двигаться по инерции. При этом момент, когда рука прекращает давление на гирю, нужно выбрать так, чтобы, двигаясь далее по инерции, гиря закончила свой путь в 1 метр в тот момент, когда скорость ее сделается равной нулю.

Можно поступить и иначе: надо на протяжении остатка пути задерживать рукой движение гири, чтобы свести к нулю накопленную ею скорость. Действуя таким образом, т. е. прилагая к гире не постоянную силу в 1 *кг*, а переменную, меняющуюся от величины большей 1 *кг* до нуля, а под конец становящуюся отрицательной, — можем мы совершить работу ровно в 1 *кгм*.

КАК НЕ НАДО ВЫЧИСЛЯТЬ РАБОТУ

Сейчас мы видели, как сложно выполнить килограммометр работы поднятием 1 *кг* на 1 *м*. Лучше поэтому вовсе не пользоваться этим обманчиво простым, в действительности же очень запутывающим определением килограммометра.

Гораздо удобнее другое определение, не порождающее никаких недоразумений: килограммометр есть работа силы в 1 *кг* на пути в 1 *м*, если направление силы совпадает с направлением пути[1].

Последнее условие — совпадение направлений — совершенно необходимо. Если им пренебречь, расчет работы

---

[1] Один из читателей возразил мне, что, ведь, и в таком случае тело может обладать в конечной точке пути некоторой скоростью, которую надо учесть. Отсюда он поспешно заключает, что сила в 1 *кг* совершает на пути 1 *м* работу большую, чем 1 *кгм*. Совершенно верно, что в конечной точке пути тело будет обладать некоторой скоростью. Но работа силы в том и состоит, что она сообщает телу определенную скорость, дает ему известный запас кинетической энергии, а именно 1 *кгм*. Если бы этого не было, нарушился бы закон сохранения энергии: получилось бы меньше энергии, чем было затрачено.

Другое дело — в случае вертикального поднятия тела: при подъеме 1 *кг* на высоту 1 *м* потенциальная энергия возрастает на 1 *кгм* и сверх того тело приобретает еще некоторую кинетическую энергию: получается как бы больше энергии, чем было израсходовано.

может привести к чудовищным ошибкам, — вроде тех, какие мы находим в книге небезызвестного писателя-педагога[1], взявшегося за решение механических задач без надлежащей подготовки. На одном из приведенных у него упражнений поучительно остановиться подольше.

«Автомобиль весом 850 *кг* едет со скоростью 2 *км* в минуту. Какова его мощность?»

Мощность — это работа, выполняемая в каждую секунду. Как же вычисляет ее наш автор? Вот его решение:

$$\frac{850 \times 2}{60}.$$

Оно заключает в себе следующие ошибки. Прежде всего автор упустил из виду, что направление веса автомобиля не совпадает с направлением его движения, и сделал расчет работы так, словно автомобиль поднимается отвесно к небу. Затем, число килограммов умножено не на число метров пути, а на число километров; результат получается, следовательно, не в килограммометрах, а «килограммокилометрах».

В сущности, по одним тем данным, которые приведены в задаче, даже и нельзя вычислить мощности автомобиля. Необходимо знать силу, увлекающую автомобиль в движение. Она равна сопротивлению, испытываемому им при движении, потому что (на горизонтальной дороге) только это сопротивление и приходится преодолевать движущей силе. Если сопротивление для автомобиля на шоссе составляет 2% его веса, то для силы, увлекающей автомобиль в движение, получим:

$$850 \times 0{,}02.$$

[1] П. Блонского в книге «Азбука труда».

Умножив эту силу на длину пути, проходимого в 1 сек. (т. е. на $\frac{2000}{60}$ *м*), получим искомую секундную работу

$$\frac{860 \times 0{,}02 \times 2\,000}{60} = 573 \text{ кгм.}$$

Это в 20 раз больше числа, указанного нашим автором. Принято выражать мощность не числом килограммометров в секунду, а в более крупных единицах, — в так называемых «паровых лошадях». Паровая лошадь[1] равна 75 *кгм* в секунду. Значит, мощность нашего автомобиля равна

$$573 : 75 = 7{,}64 \text{ пар. лош.}$$

ТЯГА ТРАКТОРА

Задача

Мощность трактора Фордзон «на крюке» — 10 паровых лошадей. Вычислить силу его тяги при каждой из скоростей, если

первая скорость	. . .	2,45 *км/час*
вторая „	. . .	4,52 „
третья „	. . .	11,32 „

Решение

Так как мощность (в *кгм* в сек.) есть секундная работа, т. е. в данном случае произведение силы тяги (в *кг*) на секундное перемещение (в *м*), то составляем для «первой» скорости Фордзона уравнение

$$75 \times 10 = x \times \frac{2{,}45 \times 1\,000}{3\,600},$$

[1] Часто говорят также «лошадиная сила». От этого устаревшего термина следовало бы совершенно отказаться: лошадиная сила — не сила, а мощность, и притом не одной, а примерно полуторы живых лошадей.

где x — сила тяги трактора. Решив уравнение, узнаем, что x = около 1000 *кг*.

Таким же образом находим, что тяга при «второй» скорости равна 540 *кг*, при «третьей» 220 *кг*.

Вопреки механике «здравого смысла» тяга оказывается тем больше, чем скорость движения меньше.

ЖИВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Может ли человек проявить мощность в целую паровую лошадь? Другими словами, может ли он выполнить в секунду 75 *кгм* работы?

Считается, — и вполне правильно, — что мощность человека при нормальных условиях работы составляет около десятой доли паровой лошади, т. е. равна 7—8 *кгм* в сек. Однако в исключительных условиях человек на короткое время проявляет значительно бо́льшую мощность. Взбегая поспешно по лестнице, мы совершаем работу больше 8 *кгм* в сек. Если мы ежесекундно поднимаем свое тело на 6 ступеней, то при весе 70 *кг* и высоте одной ступени 17 *см* мы производим работу

Рис. 54. Когда человек развивает мощность в 1 паровую лошадь?

$$70 \times 6 \times 0,17 = 71 \text{ кгм},$$

т. е. почти в 1 паровую лошадь и, значит, превосходим живую лошадь по мощности раза в $1\frac{1}{2}$. Но, конечно, так напряженно работать мы можем всего несколько минут, а затем должны отдыхать. Если учесть эти промежутки бездействия, то в среднем работа наша не будет превосходить 0,1 паровой лошади.

Недавно в Англии во время состязаний в беге на короткой дистанции (100 ярдов, т. е. 90 *м*) отмечен случай, когда бегун развил мощность в 550 *кгм*, т. е. в 7,4 паровой лошади!

Рис. 55. Когда живая лошадь развивает мощность в 7 паровых лошадей?

Живая лошадь также может доводить свою мощность до десятикратной и более величины. Совершая, например, в 1 секунду прыжок на высоту 1 *м*, лошадь весом 500 *кг* выполняет работу в 500 *кгм* (рис. 55), а это отвечает мощности

$$500 : 75 = 6{,}7 \text{ пар. лошадей.}$$

Не забудем, что паровая лошадь мощнее живой раза в полтора, так что в рассмотренном случае мы имеем более чем 10-кратное возрастание мощности.

При сельскохозяйственных работах принимается, что и человек и лошадь могут работать с перегрузкой в 200%,

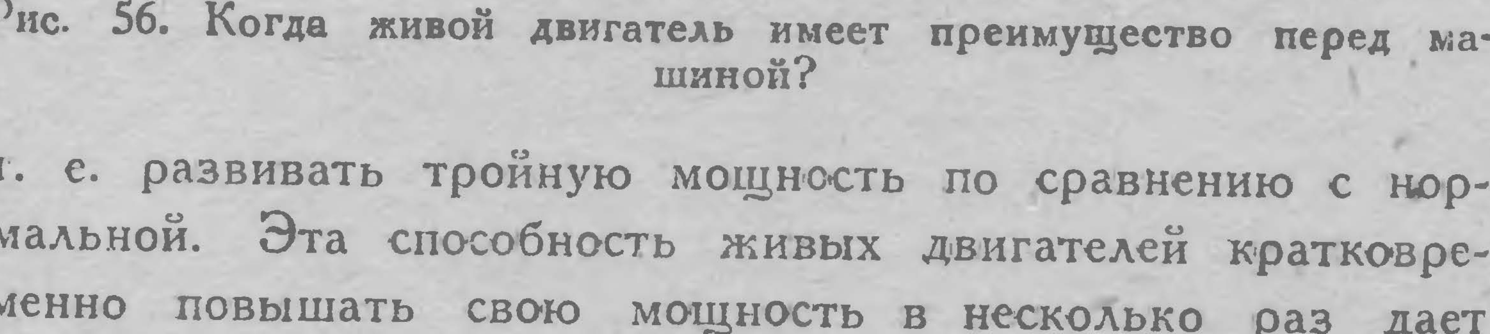


Рис. 56. Когда живой двигатель имеет преимущество перед машиной?

т. е. развивать тройную мощность по сравнению с нормальной. Эта способность живых двигателей кратковременно повышать свою мощность в несколько раз дает им большое преимущество перед двигателями механическими. На хорошем, ровном шоссе автомобиль в 10 паровых лошадей безусловно предпочтительнее повозки, запряженной двумя живыми лошадьми. Но на песчаной дороге такой автомобиль будет беспомощно увязать, между тем как пара лошадей, способных при нужде развивать мощность в 15 и более паровых лошадей, благополучно справляется с препятствиями пути. «С некоторых точек зрения, — говорит по этому поводу физик Содди, — лошадь необычайно полезная машина. Каков ее эффект, мы и не представляли себе, пока не явились автомобили, и вместо двух лошадей, обычно запрягаемых в экипаж, оказалось необходимым запрягать не меньше 12 или 15, иначе автомобиль останавливался бы у каждого пригорка».

СТО ЗАЙЦЕВ И ОДИН СЛОН

Сопоставляя живые и механические двигатели, необходимо, однако, иметь в виду и другое важное обстоятельство. Усилия нескольких лошадей не соединяются вместе по правилам арифметического сложения. Две лошади тянут с силой, которая меньше двойной силы одной лошади, три лошади — с силой, меньшей тройной силы одной лошади, и т. д. Происходит это оттого, что несколько лошадей, запряженных вместе, не согласуют своих усилий и отчасти мешают одна другой. Практика показала, что мощность лошадей при различном числе их в упряжке такова:

Число лошадей в упряжке	Мощность каждой	Общая мощность
1	1	1
2	0,92	1,9
3	0,85	2,6
4	0,77	3,1
5	0,7	3,5
6	0,62	3,7
7	0,55	3,8
8	0,47	3,8

Итак, 5 совместно работающих лошадей дают не 5-кратную тягу, а лишь $3\frac{1}{2}$-ную; 8 лошадей развивают усилие лишь в 3,8 раза превышающее усилие одной лошади, а дальнейшее увеличение числа совместно работающих лошадей дает еще худшие результаты.

Отсюда следует, что тягу, например, трактора в 10 паровых лошадей практически нельзя заменить тягой 15 живых рабочих лошадей.

Никакое вообще число живых лошадей не может заменить одного трактора, даже столь сравнительно малосильного, как «Фордзон».

У французов есть поговорка: «сто зайцев не делают одного слона». Не с меньшим правом можем мы сказать, что «сто лошадей не заменят одного трактора».

МАШИННЫЕ РАБЫ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

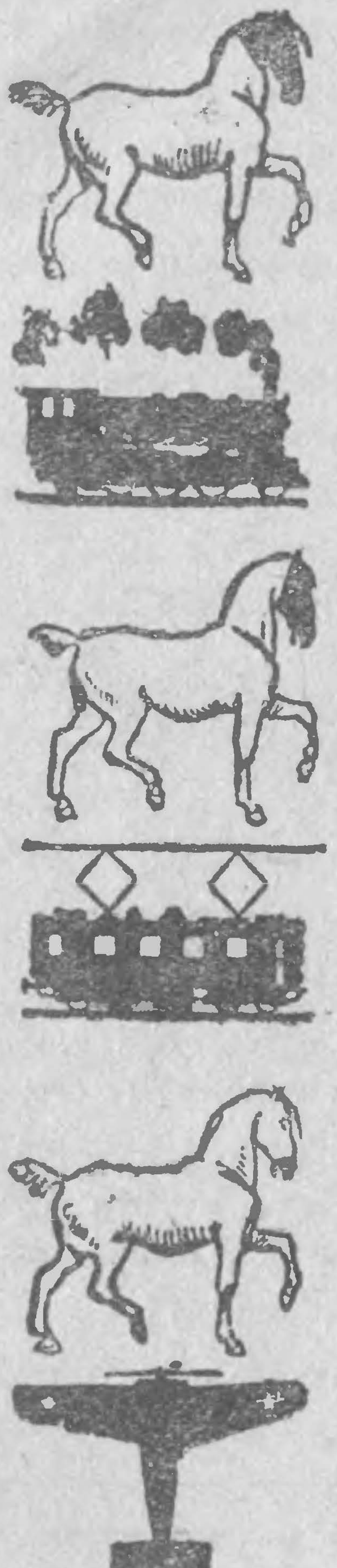


Рис. 57. Зачерненная часть контура лошади наглядно показывает, на какую долю веса приходится 1 паровая лошадь в разных механических двигателях.

Окруженные со всех сторон механическими двигателями, мы не всегда отдаем себе ясный отчет в могуществе этих наших «машинных рабов», как метко назвал их В. И. Ленин. Что всего более отличает механический двигатель от живого — это сосредоточенность огромной мощности в небольшом объеме. Самая мощная «машина», какую знал древний мир, — сильная лошадь или слон. Увеличение мощности достигалось в те времена лишь увеличением числа животных. Но соединить работоспособность многих лошадей в одной — задача, разрешенная лишь техникой нового времени.

Сто лет назад самой мощной машиной был паровой двигатель в 20 паровых лошадей, весивший 2 тонны. На 1 паровую лошадь приходилось 100 *кг* веса машины. Отождествим для простоты работоспособность живой лошади с «паровой» (хотя в действительности эта единица мощности превосходит в $1^1/_2$ раза работоспособность живой лошади). Тогда будем иметь в живой лошади 1 паровую лошадь на 500 *кг* веса (средний вес лошади), в механическом же двигателе — 1 паровую лошадь на 100 *кг* веса. Паровая машина словно соединила мощность пяти лошадей в одном организме.

Рис. 58. Соотношение весов авиамотора и живой лошади при равных мощностях.

Лучшее соотношение мощности и веса мы имеем в современном 2 000-сильном паровозе, весящем 100 тонн. А в электровозе, мощностью 4500 сил, при весе 120 тонн, мы имеем уже одну паровую лошадь на 27 *кг* веса.

Огромный прогресс в этом отношении представляют авиационные двигатели. Двигатель в 550 сил весит всего 500 *кг:* здесь одна паровая лошадь приходится, круглым счетом, на 1 *кг* веса [1]. На рис. 57 эти соотношения представлены наглядным образом: зачерненная часть контура лошади показывает, на какой вес приходится 1 паровая лошадь в соответствующем механическом двигателе.

Еще красноречивее рис. 58: здесь маленькая и боль-

---

[1] В некоторых современных авиамоторах вес спускается до $1/2$ *кг* на 1 пар. лошадь и даже еще ниже.

шая лошадь изображают, какой ничтожный вес стальных мускулов соперничает с огромной массой мышц живых.

Наконец рис. 59 дает наглядное представление об абсолютной мощности небольшого авиационного двигателя: 162 паровых лошади при объеме цилиндра всего 2 *л*.

Последнее слово в этом состязании еще не сказано

Рис. 59. Авиамотор с цилиндром емкостью 2 *л* обладает мощностью 162 лошадей.

современной техникой[1]. Мы не извлекаем из топлива всей той механической энергии, которая в него вложена. Уясним себе, какой запас работы скрывает в себе одна калория теплоты, — количество, затрачиваемое для нагревания литра воды на 1 градус. Превращенная в механическую энергию полностью — на 100% — она доставила бы нам 427 *кгм* работы, т. е. могла бы, например, поднять груз в 427 *кг* на высоту одного метра (рис. 60). Полезное же действие современных тепловых двигателей исчисляется только 10—30%: из каждой калории, пылающей в топке, они извлекают около сотни килограммометров, вместо теоретических 427.

Какой же из всех источников механической энергии, созданных человеческой изобретательностью, является самым могущественным? Огнестрельное оружие.

[1] В данный момент первенство должно быть признано за бензиново-кислородным ракетным двигателем, изготовленным в Берлине инженерами германского «Союза звездоплавания»: при весе 250 *г* мотор развивает 1380 инд. пар. лошадей, т. е. 1 пар. лошадь на 5,5 *г*.

Современное ружье при весе около 4 *кг* (из которых на действующие части оружия приходится примерно лишь половина) развивает при выстреле 400 *кгм* работы. Это кажется неособенно значительным, но не забудем, что пуля находится под действием пороховых газов только тот ничтожный промежуток времени, пока она скользит по

Рис. 60. Калория, превращенная в механическую работу, может поднять 427 *кг* на 1 *м*.

каналу ружья, — т. е. примерно 800-ю долю секунды. Так как мощность двигателей измеряется количеством работы, выполняемой в 1 сек., то, отнеся работу пороховых газов к полной секунде, получим для мощности ружейного выстрела огромное число $400 \times 800 = 320\,000$ *кгм* в секунду, или 4 300 пар. лошадей. Наконец, разделив эту мощность на вес действующих частей ружейной конструкции (2 *кг*), узнаем, что одна паровая лошадь приходится здесь на ничтожный вес механизма — в полграмма!

Представьте себе миниатюрную лошадь в полграмма весом: этот пигмей, размером с жука, соперничает в мощности с настоящей лошадью!

Если же брать не относительные числа, а поставить

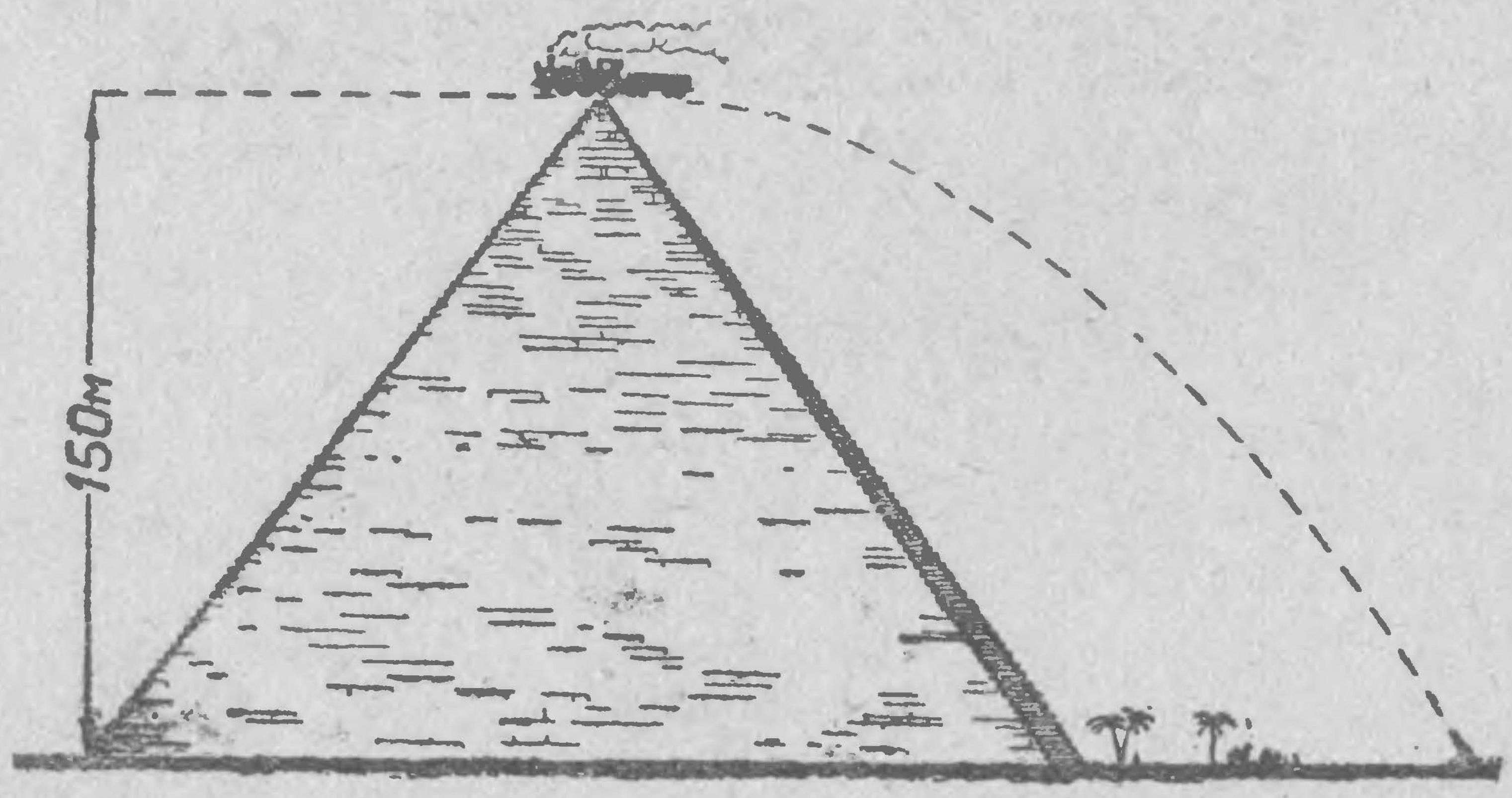


Рис. 61. Энергия снаряда крепостного орудия достаточна для поднятия 75 тонн на верхушку самой высокой пирамиды.

вопрос об абсолютной мощности, то все рекорды побивает артиллерийское орудие. Американская пушка бросает ядра в 900 *кг* со скоростью 500 *м/сек*, развивая в 100-ю долю секунды около 11 миллионов килограммометров работы. Рис. 61 дает наглядное представление об этой чудовищной работе: она равнозначаща работе поднятия груза в 75 тонн (75-тонного паровоза) на вершину пирамиды Хеопса (145 *м*). Работа эта развивается в 0,01 долю секунды; следовательно, мы имеем здесь дело с секундной мощностью в 1100 миллионов *кгм* или с 15 миллионами паровых лошадей. Столько живых лошадей с трудом наберется во всем СССР!

Показателен также и рис. 62, иллюстрирующий энергию крупного морского орудия.

Рис. 62. Теплота, соответствующая энергии снаряда крупного морского орудия, достаточна для растопления 36 тонн льда.

ОТВЕШИВАНИЕ С „ПОХОДОМ"

В прежнее время иные продавцы отвешивали товар так: последнюю порцию, необходимую для равновесия, не клали на чашку, а роняли с некоторой высоты. Коромысло весов качалось, явно склоняясь в сторону товара и радуя глаз покупателя картиной более чем добросовестного отвешивания.

Но если бы покупатель дождался, пока весы успокоятся, то, к удивлению, убедился бы в обманчивости этой картины: товара нехватает для равновесия.

Причина та, что падающее тело оказывает на опору давление, превосходящее его вес. Это ясно из следующего расчета. Пусть 10 *г* падают на чашку весов с высоты 10 *см*. Они достигнут чашки с запасом энергии, равным произведению их веса на высоту падения:

$$0{,}01 \ \text{кг} \times 0{,}1 \ \text{м} = 0{,}001 \ \text{кгм}.$$

Накопленный запас энергии расходуется на то, чтобы опустить чашку, скажем, на 2 *см*. Обозначим действующую при этом на чашку силу через F. Из уравнения

$$F \times 0{,}02 = 0{,}001$$

имеем

$$F = 0{,}05\ кг = 50\ г.$$

Итак, порция товара весом всего 10 *г*, падая на чашку, давит силой 50 *г*. Покупатель обвешен на 40 *г*, — хотя покидает прилавок в уверенности, что товар отпущен правильным весом.

ЗАДАЧА АРИСТОТЕЛЯ

За два тысячелетия до того, как Галилей (в 1630 г.) заложил основы механики, Аристотель написал свои «Механические проблемы». В числе 36 вопросов, рассмотренных в этом сочинении, имеется следующий:

«Почему, если к дереву приложить топор, обремененный тяжелым грузом, то дерево будет повреждено весьма незначительно; но если поднять топор без груза и ударить по дереву, то оно расколется? Между тем падающий груз в этом случае гораздо меньше давящего».

Задачи этой Аристотель, при смутных механических представлениях его времени, разрешить не мог. Не справятся с ней, пожалуй, и иные из моих читателей. Рассмотрим поэтому поближе задачу греческого мыслителя.

Какой кинетической энергией обладает топор в момент удара в дерево? Во-первых, той, которая была накоплена им при подъеме, когда человек взмахивал топором; и, во-вторых — той энергией, которую топор приобрел при нисходящем движении. Пусть он весит 2 *кг* и поднят на высоту 2 *м;* при подъеме в нем накоплено $2 \times 2 = 4$ *кгм* энергии. Нисходящее движение происходит под действием двух сил: тяжести и мускульного усилия рук. Если бы топор опускался только под действием своего веса, он обладал бы к концу падения кинетической энергией, равной накопленному при подъеме запасу, т. е. 4 *кгм*. Сила рук ускоряет движение топора вниз и сообщает ему добавочную кинетическую энергию; если усилие рук при движении вверх и вниз оставалось одинаковым, то добавочная энергия при опускании равна накопленной при подъеме, т. е. 4 *кгм*. Итак, в момент удара о дерево топор обладает 8 *кгм* энергии.

Далее, достигнув дерева, топор в него вонзается. Как глубоко? Допустим, на 1 *см*. На коротком пути в 0,01 *м* скорость топора сводится к нулю, и, следовательно, весь запас его кинетической энергии расходуется полностью. Зная это, нетрудно вычислить силу давления топора на дерево. Обозначив ее через F, имеем уравнение

$$F \times 0{,}01 = 8,$$

откуда сила $F = 800$ *кг*.

Это значит, что топор вдвигается в дерево с силой 800 *кг*. Что же удивительного, что столь внушительный, хотя и невидимый груз раскалывает дерево?

Так решается задача Аристотеля. Но она ставит нам новую задачу: человек не может расколоть дерева непосредственной силой своих мышц; как же может он сообщить топору силу, которой не обладает сам? Часть разгадки кроется в том, что топор есть клин, — машина, преобразующая малую силу на длинном пути в большую силу на коротком пути. Главная же причина та, что энергия, накопленная на пути в 4 *м*, расходуется на протяжении 1 *см*. Топор представляет собой «машину» даже и в том случае, когда им не пользуются как клином (кузнечный молот).

Рассмотренные соотношения делают понятным, почему для замены действия молота требуются столь сильные прессы; например, молоту в 150 *т* соответствует пресс в 5000 *т*, молоту в 20 *т* — пресс в 600 *т* и т. п.

Действие сабли объясняется теми же причинами. Конечно, большое значение имеет то, что действие силы сосредоточивается на лезвии, имеющем ничтожную поверхность; давление на квадратный сантиметр получается огромное (сотни атмосфер). Но важен и размах: прежде чем ударить, конец сабли описывает путь метра в $1^1/_2$, а в теле жертвы проходит всего около десятка сантиметров. Энергия, накопленная на пути в $1^1/_2$ *м*, расходуется на пути в 10—15 раз меньшем. Действие руки бойца усиливается от этой причины соответственно в 10—15 раз.

УПАКОВКА ХРУПКИХ ВЕЩЕЙ

При упаковке хрупких вещей прокладывают их соломой, стружками, бумагой и т. п. материалами. Для чего это делается, понятно: чтобы предохранить от поломки. Но почему солома и стружки оберегают вещи от поломок? Ответ, что они «смягчают» удары при сотрясениях, есть лишь пересказ того, что спрашивается. Надо найти причины этого смягчающего действия.

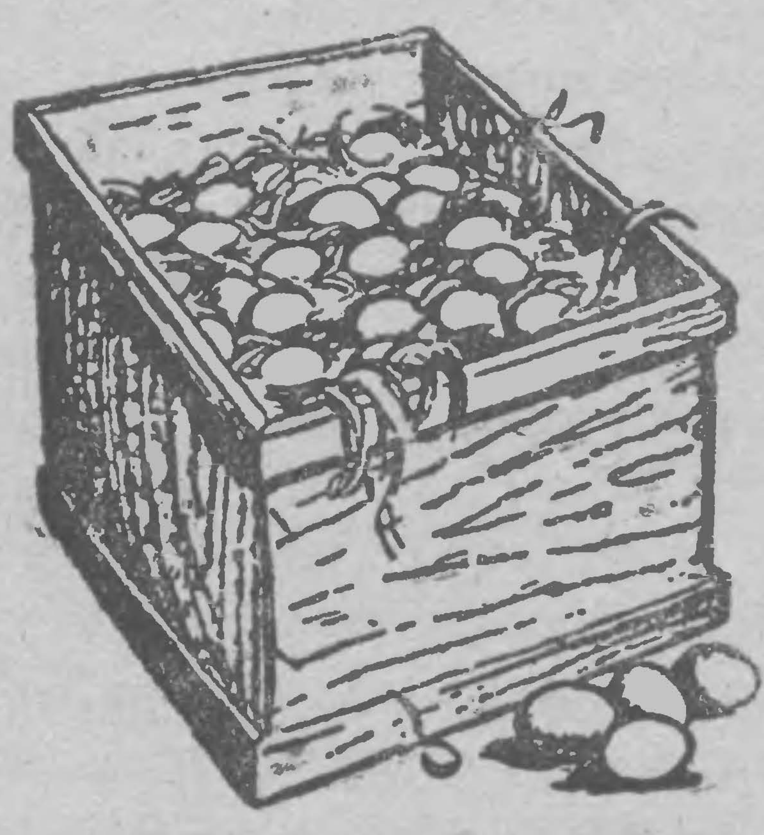


Рис. 63. Для чего яйца при упаковке перекладывают стружкой?

Их две. Первая та, что прокладка увеличивает площадь взаимного соприкосновения хрупких вещей: острое ребро или угол одной вещи напирает через упаковку на другую уже не по линии, не в точке, а по целой полоске или площадке. Давление распространяется на бо́льшую площадь и оттого соответственно уменьшается.

Вторая причина действует только при сотрясениях. Когда ящик с посудой испытывает толчок, каждая вещь приходит в движение, которое тотчас же прекращается, так как соседние вещи ему мешают. Энергия движения затрачивается тогда на прогибание сталкивающихся предметов, которое зачастую оканчивается их разрушением. Так как путь, на котором расходуется при этом энергия, очень мал, то надавливающая сила должна быть весьма велика, чтобы произведение ее на путь (FS), составило величину расходуемой энергии.

Теперь понятно действие мягкой прокладки: она удлиняет путь (S) действия силы и, следовательно, уменьшает величину надавливающей силы (F). Без прокладки путь этот очень короток: стекло или яичная скорлупа могут вдавливаться, не разрушаясь, лишь на ничтожную величину, измеряемую десятыми долями миллиметра. Слой соломы, стружек или бумаги между примыкающими друг к другу частями упакованных предметов удлиняет путь действия силы в десятки раз, во столько же раз уменьшая ее величину.

В этом — вторая и главная причина предохраняющего действия мягкой прокладки между хрупкими предметами.

ЧЬЯ ЭНЕРГИЯ?

Западни, изображенные на рис. 64 и 65, устраиваются неграми Восточной Африки. Задевая прогянутую у земли бечевку, слон обрушивает на свою спину тяжелый обрубок дерева с острым гарпуном. Больше изобретательности вложено в западню рис. 66: животное, задевшее шнур, спускает стрелу, которая вонзается в жертву.

Откуда берется здесь энергия, поражающая животное, понятно: это — преобразованная энергия того человека, который поставил западни. Падающий с высоты обрубок возвращает работу, которая была затрачена человеком при поднятии этого груза на высоту. Стреляющий лук второй

Рис. 64. Слоновая западня в африканском лесу.

западни также возвращает энергию, израсходованную охотником, который натянул тетиву. В обоих случаях животное только освобождает «заряд» энергии, накопленный в потенциальном состоянии. Чтобы действовать после этого опять, западни нуждаются в новом заряде.

Иначе обстоит дело в той западне, о которой говорит общеизвестный рассказ про медведя и бревно. Взбираясь по стволу дерева, чтобы добраться до улья, медведь натолкнулся на подвешенное бревно, мешающее карабкаться

Рис. 65. Западня-самострел (Африка).

дальше. Он оттолкнул препятствие; бревно откачнулось, но вернулось на прежнее место, слегка ударив животное.

Медведь оттолкнул бревно сильнее; оно возвратилось и ударило крепче. С возрастающей яростью стал отбрасывать медведь бревно, — но, возвращаясь, оно наносило животному все более и более чувствительные удары. Обессиленный борьбой медведь упал, наконец, вниз, на вбитые под деревом острые колья.

Эта остроумная западня не требует зарядки. Свалив первого медведя, она может вслед затем покончить со вторым, третьим и т. д., без всякого участия человека. Откуда же берется здесь энергия ударов, сваливших медведя с дерева?

В этом случае работа производится уже за счет энергии самого животного. Медведь сам свалил себя с дерева и сам пробил себя кольями. Отбрасывая подвешенное бревно, он превращал энергию своих мускулов в потенциальную энергию поднятого бревна, которая затем преобразовывалась в кинетическую энергию бревна падающего. Точно так же, взбираясь на дерево, медведь преобразовал часть мускульной энергии в потенциальную энергию своего поднятого тела, которая затем проявилась в энергии удара его туши о колья. Словом, медведь сам избивает себя, сам сваливает себя вниз и сам пробивает себя кольями. Чем сильнее животное, тем серьезнее должно оно пострадать от такой потасовки.

Рис. 66. Медведь в борьбе с подвешенным бревном.

САМОЗАВОДЯЩИЕСЯ МЕХАНИЗМЫ

Знаком ли вам небольшой прибор, называемый шагомером? Он имеет величину и форму карманных часов, предназначен для ношения в кармане и служит для автоматического подсчета шагов. На рис. 67 изображен его

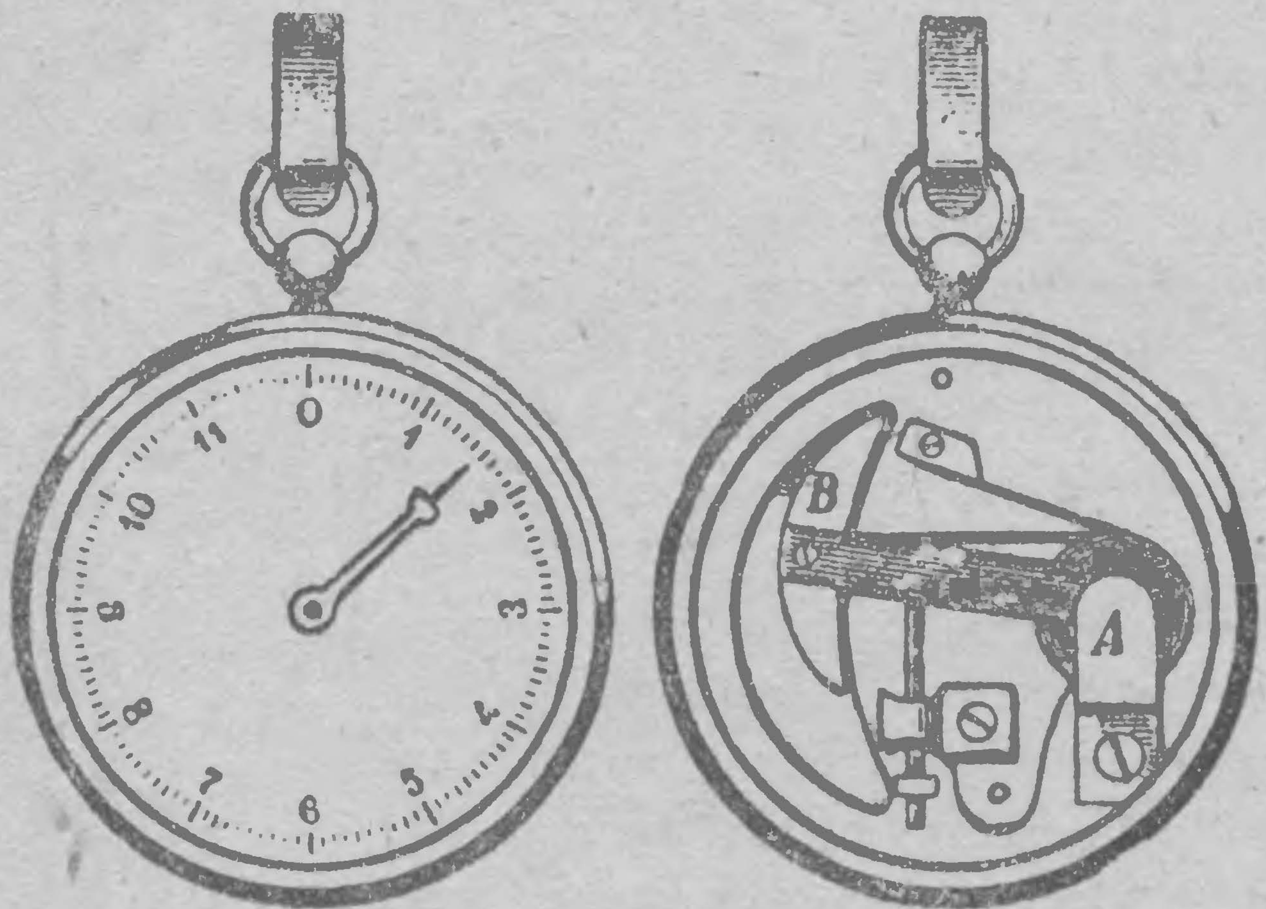


Рис. 67. Шагомер и его механизм.

циферблат и внутреннее устройство. Главную часть механизма составляет грузик *B*, прикреплённый к концу рычага *AB*, который может вращаться около точки *A*. Обычно грузик находится в положении, изображенном на рисунке; слабая пружинка удерживает его в верхней части прибора. При каждом шаге туловище пешехода, а с ним и шагомер немного приподнимаются и затем опускаются. Но грузик *B*, вследствие инерции, не сразу следует за поднимающимся приборчиком и преодолевая упругость пружины, оказывается внизу. При опускании же шагомера грузик, по той же причине, перемещается вверх. От этого рычаг AB при каждом шаге совершает двойное колебание, которое помощью зубчатки двигает стрелку на циферблате и регистрирует шаги пешехода.

Если вас спросят, что является источником энергии, движущей механизм шагомера, вы, конечно, безошибочно укажете на мускульную работу человека. Но заблуждение думать, что шагомер не требует от пешехода дополнительного расхода энергии: пешеход де «все равно ходит» и не делает будто бы ради шагомера никаких лишних усилий. Он безусловно совершает лишние усилия, поднимая шагомер на некоторую высоту против силы тяжести, а также против упругости пружины, удерживающей грузик B.

Шагомер наводит на мысль устроить карманные часы, которые приводились бы в действие повседневными движениями человека. Такие часы уже изобретены. Их носят на руке, беспрестанные движения которой и заводят их пружину без всяких забот обладателя. Достаточно носить эти часы на руке несколько часов, чтобы они оказались заведенными более чем на сутки. Часы очень удобны: они всегда заведены, поддерживая пружину постоянно в одинаковом напряжении, чем обеспечивается правильность хода; в их корпусе нет сквозных отверстий, обусловливающих засорение механизма пылью и его увлажнение; главное же — не приходится заботиться о периодическом заводе часов [1].

---

[1] Один из читателей этой книги, имевший дело с самозаводящимися часами, сообщил мне о них следующее: «Работая в Центральной научно-технической часовой лаборатории, я выписал из Швейцарии от двух фирм, изготовляющих эти часы массовым путем, два образца. Нам всем казалось, что такие часы годны для слесарей, портных, пианистов и особенно для машинисток, а не для работников умственного труда. Но рассуждая так, мы упустили из виду одно свойство хорошо слаженных часовых ходов: чтобы заставить такой ход итти, нужен самый незначительный импульс. Оказалось, что два-три движения заставляют тяжелый молоток слегка завести

Можно ли считать такие часы не нуждающимися в энергии их владельца для поддержания своего хода? Нет, они потребляют ровно столько же мускульной энергии, сколько расходуется и на завод обыкновенных часов. Движение руки, отягченной такими часами, требует избыточной затраты энергии по сравнению с рукой, несущей часы обыкновенного устройства: часть энергии расходуется, как и в шагомере, на преодоление упругости пружины.

Рассказывают, что владелец одного магазина в Америке «догадался» использовать движение дверей своего магазина, чтобы заводить пружину механизма, выполняющего полезную хозяйственную работу. Изобретатель полагал, что нашел даровой источник энергии, так как покупатели «все равно открывают двери». В действительности же посетитель, открывая двери, делал лишнее усилие на преодоление упругости заводимой пружины. Попросту говоря, владелец магазина заставлял каждого своего покупателя немного поработать и в его хозяйстве.

В обоих указанных случаях мы имеем, строго говоря, не самозаводящиеся механизмы, а лишь такие, которые заводятся мускульной энергией человека без его ведома.

ДОБЫВАНИЕ ОГНЯ ТРЕНИЕМ

Если судить по книжным описаниям, добывание огня трением — дело легкое. Однако людям белой расы это искусство почему-то не дается. Вот как рассказывает Марк Твэн о своих попытках применить на практике подобные книжные указания:

«Каждый из нас взял по две палочки и принялся тереть их одну о другую. Через два часа мы совершенно

пружину и завода хватает на 3—4 часа». От себя прибавлю, что для завода карманных часов на целые сутки нужна энергия в 0,1—0,15 килограммометра.

заледенели; палочки также (дело происходило зимою). Мы горько проклинали индейцев, охотников и книги, которые подвели нас своими советами».

О подобной же неудаче сообщает и другой американский писатель — Джек Лондон (в «Морском волке»):

«Я читал много воспоминаний, написанных потерпевшими крушение: все они пробовали этот способ безуспешно. Припоминаю газетного корреспондента, путешествовавшего по Аляске и Сибири. Я однажды встретил его у знакомых, где он рассказывал, как пытался добыть огонь именно трением палки о палку. Он забавно и неподражаемо рассказывал об этом неудачном опыте. В заключение он сказал: «Островитянин южных морей быть может сумеет это сделать; может быть добьется успеха и малаец. Но это безусловно превышает способности белого человека».

Жюль Верн в «Таинственном острове» высказывает совершенно такое же суждение. Вот разговор бывалого моряка Пенкрофа с юношей Гербертом:

«— Мы могли бы добыть огонь, как дикари, трением одного куска дерева о другой.

«— Что же, мой мальчик, попробуй; посмотрим, добьешься ли ты чего-нибудь таким способом, кроме того, что разотрешь себе руки в кровь.

«— Однако же, этот простой способ весьма распространен на островах Тихого океана.

«— Не спорю, — возразил моряк, — но думаю, что у дикарей есть особая к этому сноровка. Я не раз безуспешно пытался добыть огонь таким способом и решительно предпочитаю спички.

«Пенкроф, — рассказывает далее Жюль Верн, — попробовал все-таки добыть огонь трением двух сухих кусков дерева. Если бы затраченная им и Набом (негром) энергия была превращена в тепловую, ее хватило

Рис. 68. Как в действительности добывают огонь трением.

бы, чтобы довести до кипения котлы трансатлантического парохода. Но результат получился отрицательный: куски дерева едва нагрелись, — меньше, чем сами исполнители опыта.

«После часа работы Пенкроф обливался пóтом. Он с досадой бросил куски дерева.

«— Скорее среди зимы наступит жара, чем я поверю, что дикари этим способом добывают огонь, — сказал он. — Легче, пожалуй, зажечь собственные ладони, потирая их одну о другую».

Причина неудач в том, что принимались за дело не так, как следует. Большая часть первобытных народов добывает огонь не простым трением одной палки о другую, а **сверлением** одной концом другой (рис. 68).

Разница между этими способами выясняется при ближайшем рассмотрении.

Пусть палочка CD (черт. 69) движется туда и назад поперек палочки AB, делая в секунду два хода с размахом 25 *см*. Силу рук, прижимающих палочки, оценим в 2 *кг* (числа берутся произвольные, но правдоподобные). Так как сила трения дерева о дерево составляет около 40% силы, придавливающей трущиеся куски, действующая сила равна в этом случае $2 \times 0{,}4 = 0{,}8$ *кг*, а работа ее на пути 50 *см* составляет $0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}4$ *кгм*. Если бы эта механическая работа полностью превратилась в теплоту, она дала бы $0{,}4 \times 2{,}3 = 0{,}92$ малых калорий[1]. Какому объему древесины сообщится эта теплота? Дерево — плохой проводник теплоты; поэтому теплота, возникающая при трении, проникает в дерево очень неглубоко. Пусть толщина прогреваемого слоя всего лишь 0,5 *мм*[2]. Величина трущейся поверхности равна 50 *см*, умноженным на ширину соприкасающейся поверхности, которую примем равной 1 *см*. Значит, возникающей при трении теплотой прогревается объем дерева в

$$50 \times 1 \times 0{,}05 = 2{,}5 \text{ см}^3.$$

Вес такого объема дерева около 1,25 *г*. При теплоемкости дерева 0,6 объем этот должен нагреться на

$$\frac{0{,}92}{1{,}25 \times 0{,}6} = \text{около } 1^\circ.$$

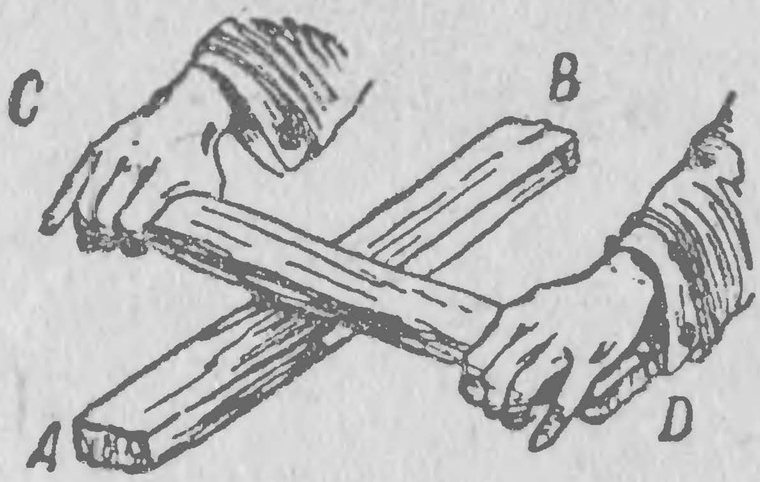


Рис. 69. Книжный способ добывания огня трением.

Если бы, значит, не было потери тепла вследствие остывания, то трущаяся палочка ежесекундно нагревалась бы примерно на 1 градус. Но так как вся палочка доступна охлаждающему действию воздуха, то остывание должно быть значительно. Вполне правдоподобно поэтому утверждение Марка Твэна, что палочки при трении не только не нагрелись, но даже обледенели.

---

[1] Один килограммометр, превращаясь полностью в теплоту, дает 2,3 малой калории.

[2] Читатель увидит из дальнейшего, что смысл результата мало меняется, если взять толщину слоя несколько бо́льшую.

Другое дело — сверление (рис. 68). Пусть поперечник конца вращающейся палочки 1 *см* и конец этот входит в дерево на 1 *см*. Размах смычка (2 хода в сек.) 25 *см*, а сила, приводящая его во вращение, пусть равна 2 *кг*. Секундная работа равна в этом случае тоже $0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}4$ *кгм*, и количество возникающей теплоты 0,92 мал. калорий. Но нагреваемый объем дерева заметно меньше, чем в первом случае: $3{,}14 \times 0{,}05 = 0{,}15$ *см*^{3}, а вес его — 0,075 *г*. Значит, теоретически температура в гнезде палочки должна подняться в секунду на

$$\frac{0{,}92}{0{,}075 \times 0{,}6} = 20^\circ.$$

Такое повышение температуры (или близкое к нему) будет действительно достигаться, так как при сверлении нагреваемая часть дерева хорошо защищена от охлаждения. Температура воспламенения дерева равна 250°, и чтобы довести палочку до горения, достаточно при таком способе

$$250^\circ : 20^\circ = 12 \text{ секунд.}$$

Правдоподобие нашего подсчета подтверждается тем, что, по свидетельству авторитетного немецкого этнолога К. Вейле, опытные «сверлильщики огня» среди африканских негров добывают огонь в несколько секунд [1]. Впрочем, всем известно, как часто загораются оси плохо смазанных телег: причина в этом случае та же.

---

[1] Кроме сверления, у первобытных народов практикуются и иные способы добывания огня трением — помощью «огневого плуга», а также «огневой пилы». В обоих случаях нагревающимся частям древесины — древесной муке — обеспечивается защита от охлаждения. Весьма обстоятельное описание приемов добывания огня, практикуемых первобытными народами, читатель найдет в книге проф. Карла Вейле «Культура безкультурных народов» (стр. 78—92 русского перевода. 1913).

ЭНЕРГИЯ РАСТВОРЕННОЙ ПРУЖИНЫ

Вы согнули стальную пружину. Затраченная вами работа превратилась в потенциальную энергию напряженной пружины. Вы можете вновь получить израсходованную энергию, если заставите распрямляющуюся пружину поднимать грузик, вращать колесо и т. п.; часть энергии возвратится в форме полезной работы, часть же уйдет на преодоление вредных сопротивлений (трения). Ни один эрг не пропадет бесследно.

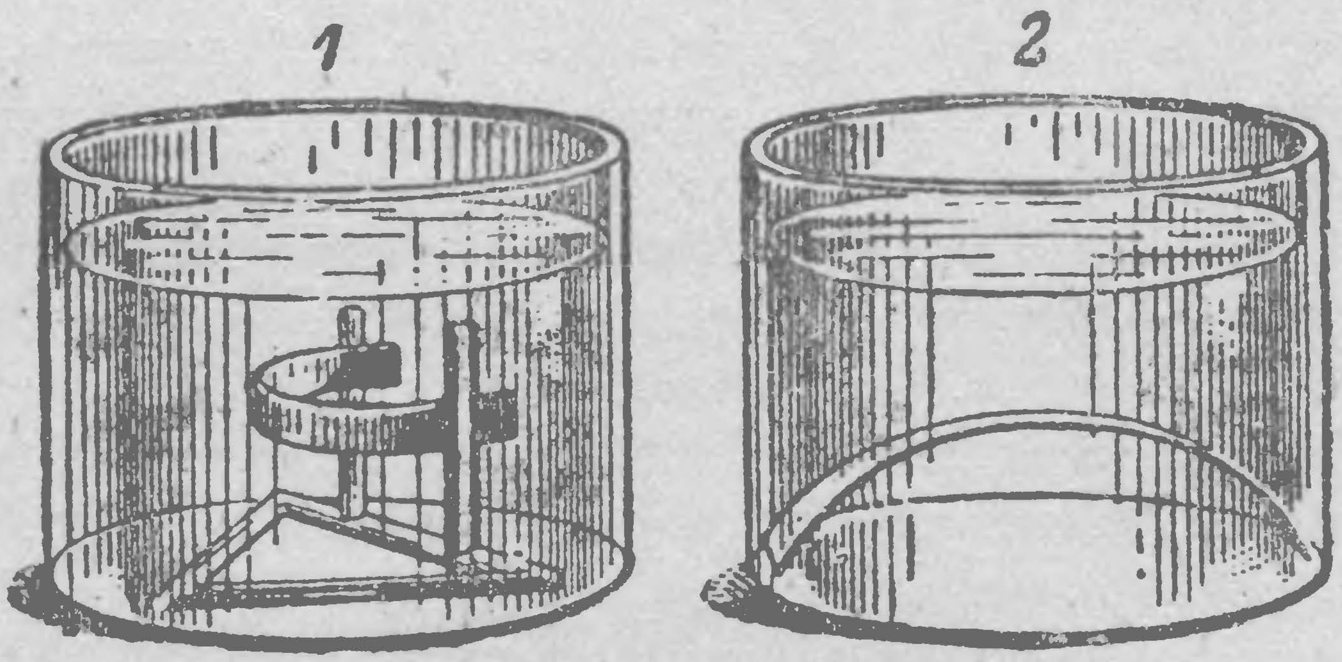


Рис. 70. Опыт с растворением напряженной пружины.

Но вы поступаете с согнутой пружиной иначе: опускаете в серную кислоту, и стальная полоска растворяется. Должник исчез: не с кого взыскать энергию, затраченную на сгибание пружины. Закон сохранения энергии как будто нарушен.

Так ли? Почему собственно мы должны думать, что энергия в этом случае исчезла бесследно? Она могла проявиться в форме кинетической энергии в тот момент, когда пружина, разъеденная кислотой, лопнула, сообщив движение своим частям и окружающей жидкости. Могла она преобразоваться и в теплоту, подняв температуру жидкости. Но ожидать сколько-нибудь заметного повышения температуры не приходится. В самом деле, пусть края согнутой пружины сближены по сравнению с распрямленной на 10 *см* (0,1 *м*). Напряжение пружины примем равным 2 *кг*; значит, с р е д н я я величина силы, сгибавшей пружину, равнялась 1 *кг*. Отсюда потенциальная энергия пружины равна $1 \times 0{,}1 = 0{,}1$ *кгм*. Это соответствует количеству тепла $2{,}3 \times 0{,}1 = 0{,}23$ мал. калории. Такое незначительное количество тепла может поднять температуру всего раствора лишь на ничтожную долю градуса, практически неуловимую.

Допустима, однако, возможность перехода энергии согнутой пружины также в электрическую или химическую; в последнем случае это могло бы сказаться либо ускорением разъедания пружины (если возникшая химическая энергия способствует растворению стали), либо замедлением этого процесса (в обратном случае).

Какая из перечисленных возможностей имеет место на самом деле, может обнаружить только опыт.

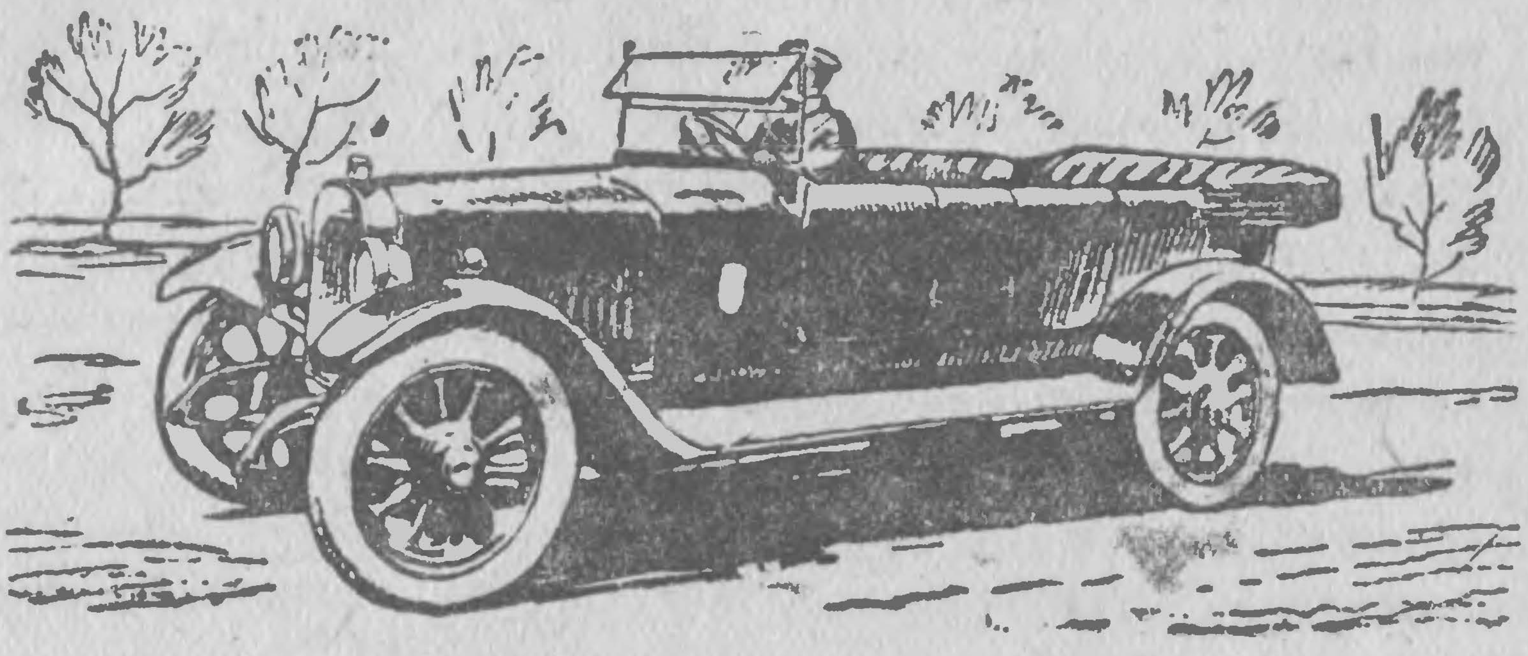
Подобный опыт и был произведен (экспериментатор, доктор Гуго Куль, описал его в немецком журнале, «Космос»). Стальная полоска в согнутом положении была зажата между двумя стеклянными палочками, установленными на дне стеклянного сосуда в полусантиметре одна от другой (рис. 70 налево). В другом опыте пружина упиралась прямо в стенки сосуда. В сосуд налили серную кислоту (12 ч. 100% кислоты в 1 *л* воды). Полоска вскоре лопнула и обе части были оставлены в кислоте до полного растворения. Продолжительность опыта — от погружения в кислоту пружины до растворения ее частей — была тщательно измерена. Затем опыт растворения был повторен с такой же полоской в н е с о г н у т о м состоянии, при вполне одинаковых прочих условиях. Оказалось, что растворение ненапряженной полоски потребовало м е н ь ш е времени.

Это показывает, что напряженная пружина стойче сопротивляется растворению, чем ненапряженная. Значит, несомненно, что энергия, затраченная на сгибание пружины, частью переходит в химическую, частью же — в механическую энергию движущихся частей пружины. Бесследного исчезновения энергии не происходит.

В связи с рассмотренной сейчас задачей я получил несколько писем от читателей, предлагавших мне разъяснить их недоумение по аналогичному поводу. Один задает такую задачу:

«Вязанка дров доставлена на 4-й этаж, отчего запас ее потенциальной энергии увеличился. Куда девается этот избыток потенциальной энергии, когда дрова сгорают?»

Разгадку нетрудно найти, если вспомнить, что после сгорания дров вещество их переходит в продукты горения, которые, образовавшись на известной высоте над землей, обладают большей потенциальной энергией, нежели в том случае, когда они возникают на уровне земной поверхности.



Глава девятая

ТРЕНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ

С ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

Задача

С ледяной дорожки, наклон которой 30°, а длина 12 *м*, скатываются санки и мчатся далее по горизонтальной поверхности.

На каком расстоянии они остановятся?

Решение

Если бы санки скользили по льду без трения, они бы никогда не остановились. Но сани движутся с трением, хотя и небольшим: коэфициент трения железных полозьев о лед равен 0,02. Поэтому они будут двигаться лишь до тех пор, пока энергия, накопленная при скатывании с горы, не израсходуется полностью на преодоление трения.

Чтобы вычислить длину этого пути, определим, сколько энергии накопляют санки, скатившись с горы. Высота AC

(черт. 71), с какой санки спускаются, равна половине AB (катет против $30°$ составляет половину гипотенузы). Значит $AC = 6$ *м*. Если вес саней P, то кинетическая энергия, приобретаемая у основания горки, равна $6P$ *кгм* — при условии отсутствия трения. Трение составляет 0,02 силы Q, равной $P\cos 30°$, т. е. $0{,}87P$. Следовательно, преодоление трения поглощает

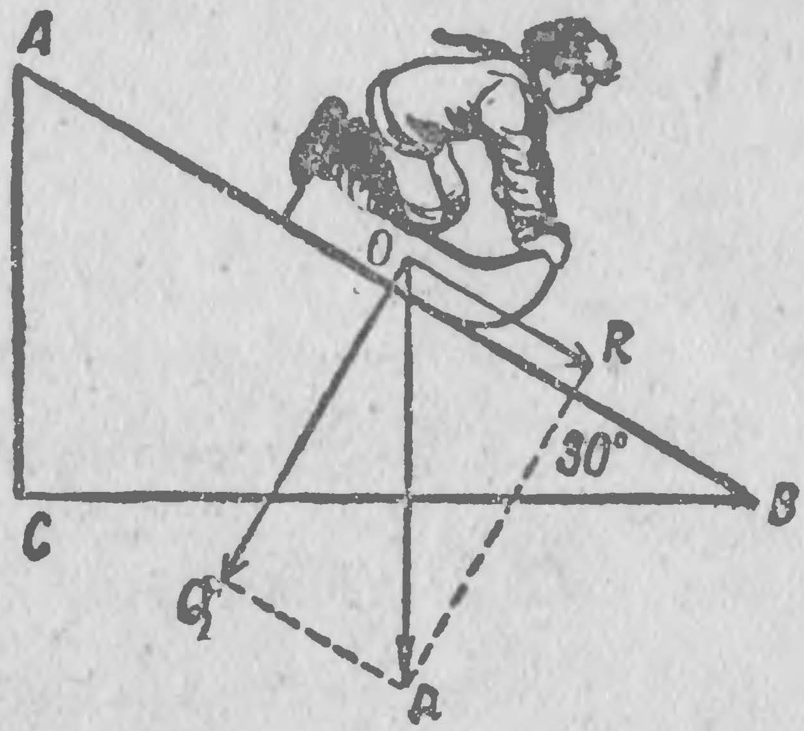


Рис. 71. Как далеко прокатятся санки?

$$0{,}02 \times 0{,}87P \times 12 = 0{,}21P \text{ кгм};$$

накопленная кинетическая энергия составляет

$$6P - 0{,}21P = 5{,}79P \text{ кгм}.$$

При дальнейшем пробеге саней по горизонтальному пути, длину которого обозначим через x, работа трения равна $0{,}02\ Px$ *кгм*. Из уравнения

$$0{,}02Px = 5{,}79P$$

имеем $x = 290$ *м*: сани, соскользнув с ледяной горы, пройдут по горизонтальному пути около 300 *м*.

С ВЫКЛЮЧЕННЫМ МОТОРОМ

Задача

Шофер автомобиля, мчащегося по горизонтальному шоссе со скоростью 72 *км/час*, выключил мотор. Какое расстояние проедет после этого автомобиль, если сопротивление движению составляет 2%?

Решение

Задача эта сходна с предыдущей, но накопленный экипажем запас энергии вычисляется здесь по другим данным. Энергия движения автомобиля (его «живая сила») равна $\frac{mv^2}{2}$, где m — масса автомобиля, а v — его скорость. Этот запас работы расходуется на пути x, причем сила, действующая на автомобиль при его движении по пути x, составляет 2% веса P экипажа. Имеем уравнение:

$$\frac{mv^2}{2} = 0{,}02\,Px.$$

Так как вес P автомобиля равен mg, где g — ускорение тяжести, то уравнение принимает вид:

$$\frac{mv^2}{2} = 0{,}02\,mgx,$$

откуда искомое расстояние:

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

В окончательный результат не входит масса автомобиля; значит, путь, проходимый автомобилем после выключения мотора, не зависит от массы экипажа. Подставив $v = 20$ *м/сек*, $g = 9{,}8$ *м/сек*^{2}, получаем, что искомое расстояние равно около 1000 *м*; автомобиль проедет по ровной дороге целый километр.

ТЕЛЕЖНЫЕ КОЛЕСА

Почему у большинства повозок передние колеса делаются меньшего размера, чем задние — даже и тогда, когда передок не поворотный и передние колеса не должны подходить под кузов?

Чтобы доискаться правильного ответа, надо вопрос поставить иначе: спрашивать не о том, почему передние колеса меньше, а о том, почему задние **больше**. Дело в том, что целесообразность малого размера передних колес понятна сама собой; низкое положение оси этих колес придает оглоблям и постромкам наклон, облегчающий лошади вытаскивание телеги из выбоин дороги.

Рис. 72. Почему передние колеса выгодно делать маленькими?

Рис. 72 поясняет, почему при наклонном положении оглобли AO тяга OP лошади, разлагаясь на составляющие OQ и OR, дают силу (OR), направленную вверх и облегчающую вытаскивание воза из выбоины. При горизонтальном же положении оглобель (*рис. 72, направо*) не получается силы, направленной вверх; вытащить воз из выбоины тогда трудно. На хорошо содержимых дорогах, где таких неровностей пути не бывает, излишне и низкое положение оси передних колес. Поэтому у нас скоро можно будет видеть повозки с одинаковыми передними и задними колесами, как это стало обычным в Москве.

Перейдем теперь к вопросу задачи: почему задние колеса не делаются одного диаметра с передними? Причина та, что большие колеса выгоднее малых, так как испытывают меньшее **трение**. Трение катящегося тела — так называемое трение второго рода — обратно пропорционально радиусу. Отсюда ясна целесообразность большого диаметра задних колес.

НА ЧТО РАСХОДУЕТСЯ ЭНЕРГИЯ ПАРОВОЗОВ И ПАРОХОДОВ?

Согласно механике «здравого смысла» паровозы и пароходы расходуют свою энергию на собственное передвижение. Между тем только в первую четверть минуты энергия паровоза затрачивается на приведение его и поезда в движение. Остальное же время (на горизонтальном пути) энергия расходуется только на то, чтобы преодолевать трение и сопротивление воздуха. Как метко заметил один из моих знакомых, энергия трамвайной электростанции целиком расходуется на то, чтобы согревать воздух города, — работа трения превращается в теплоту. Не будь этих помех движению, поезд, разогнавшись в течение первых 10—20 секунд, двигался бы по инерции неопределенно долго, не затрачивая энергии.

Мы уже говорили ранее, что движение равномерное совершается без участия силы и, следовательно, без расхода энергии. Если же при равномерном движении происходит трата энергии, то расходуется она на преодоление помех равномерному движению. Мощные машины пароходов нужны также лишь для того, чтобы преодолевать сопротивление воды. Оно весьма значительно по сравнению с сопротивлением при сухопутном транспорте и, кроме того, быстро растет с увеличением скорости (пропорционально второй ее степени). В этом кроется, между прочим, причина того, почему на воде недостижимы столь значительные скорости, как на суше[1]. В Америке поезд в 400 тонн весом мчится со скоростью 90 *км/час*; никакое судно такого же веса не может перемещаться с подобной скоростью. «Гребец, — говорит Вильямс, автор книги

---

[1] Сказанное не относится к тем судам (так наз. глиссерам), которые скользят по воде, почти не погружаясь в нее; встречая поэтому со стороны воды лишь незначительное сопротивление, глиссеры способны развивать сравнительно большие скорости.

«Гляди в корень» — легко может двигать лодку со скоростью 6 *км/час*; но увеличение скорости на 1 *км* напрягает все его силы. А чтобы легкая гоночная лодка скользила со скоростью 20 *км/час*, нужна уже отлично тренированная команда из восьми человек, гребущих изо всех сил».

Если сопротивление воды движению растет очень быстро с увеличением скорости, то и увлекающая сила воды чрезвычайно быстро возрастает со скоростью. Сейчас мы побеседуем об этом подробнее.

КАМНИ, УВЛЕКАЕМЫЕ ВОДОЙ

Подмывая и разрушая берег, река сама переносит обломки от места их падения в другие части своего ложа. Вода перекатывает по дну камни, нередко довольно круп-

Рис. 73. Горный поток перекатывает камни.

ные, — способность, приводящая многих в изумление. Удивляются, как может вода увлекать камни. Правда, это делает не всякая река. Равнинная, медленно текущая река увлекает течением только мелкие песчинки. Но достаточно небольшого увеличения скорости, чтобы весьма заметно усилить увлекающую мощь водяного потока. При удвоенной скорости река не только уносит песчинки, но перекатывает уже крупную гальку. А горный поток, текущий еще вдвое быстрее, увлекает булыжники в килограмм и более весом. Чем объяснить эти явления?

Мы имеем здесь любопытное следствие закона механики, известного в гидрологии под названием «закона Эри». Закон утверждает, что увеличение скорости течения в n раз сообщает потоку способность увлекать предметы в n^6 раз более тяжелые.

Покажем, почему существует здесь такая — весьма редкая в природе — пропорциональность 6-й степени.

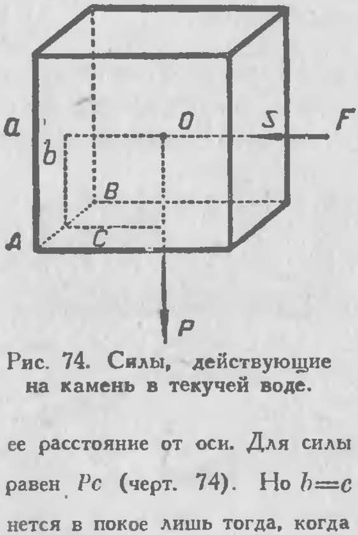


Рис. 74. Силы, действующие на камень в текучей воде.

Для простоты вообразим каменный кубик с ребром a (рис. 74), лежащий на дне реки. На боковую его грань S действует сила F — напор текущей воды. Она стремится повернуть кубик вокруг ребра AB. Этому препятствует сила P — вес кубика в воде, — стремящаяся повернуть его обратно вокруг того же ребра. Чтобы камень остался в равновесии, необходимо — по правилам механики — равенство «моментов» обеих сил F и P относительно оси AB. Моментом силы относительно оси называется произведение величины этой силы на ее расстояние от оси. Для силы F момент равен Fb, для силы P он равен Pc (черт. 74). Но $b=c=\frac{a}{2}$. Следовательно, камень останется в покое лишь тогда, когда

$$F\cdot\frac{a}{2}\leqslant P\cdot\frac{a}{2};\ \text{т. е. } F\leqslant P.$$

Далее применим формулу

$$Ft=mv,$$

где t означает продолжительность действия силы, m — масса воды, участвующая в напоре за t секунд, v — скорость течения.

Масса m воды, притекающая в t секунд к боковой грани S, равна

$$Svt=a^2vt.$$

Значит,

$$Ft = mv = a^2vt \cdot v = a^2v^2t,$$

при $t = 1$ имеем:

$$F = a^2v^2.$$

Вес P куба в воде равен его объему (a^3), умноженному на удельный вес d его материала, минус вес такого же объема воды (закон Архимеда)

$$P = a^3d - a^3 = a^3(d - 1).$$

Условие равновесия $F \leqslant P$ принимает вид:

$$a^2v^2 \leqslant a^3(d - 1),$$

откуда

$$a \geqslant \frac{v^2}{d-1}.$$

Ребро (a) куба, могущего противостоять потоку, скорость которого v, пропорционально второй степени скорости (v^2). Вес же куба, мы знаем, пропорционален третьей степени его ребра (a^3). Следовательно, вес увлекаемых водой каменных кубов возрастает с 6-й степенью скорости течения, так как $(v^2)^3 = v^6$.

В этом и состоит «закон Эри». Мы вывели его для камней кубической формы, но не трудно обобщить вывод для тел любой формы.

Как иллюстрацию этого закона, представьте себе три реки; скорость второй вдвое больше скорости первой, а третьей — еще вдвое больше. Иначе говоря, скорости их относятся как $1 : 2 : 4$. По закону Эри, вес камней, увлекаемых этими потоками, будет относиться, как $1 : 2^6 : 4^6 = 1 : 64 : 4096$. Вот почему, если спокойная река увлекает только песчинки в $\frac{1}{4}$ грамма весом, то вдвое более быстрая река может увлекать камешки до 16 *г*, а еще вдвое более быстрая горная река способна уже перекатывать камни весом во много килограмм.

СКОРОСТЬ ДОЖДЕВЫХ КАПЕЛЬ

Косые линии дождевых струй на оконных стеклах движущегося вагона свидетельствуют о замечательном явлении. Здесь происходит сложение двух движений по правилу параллелограма, так как капли дождя, падая вниз, участвуют одновременно и в движении поезда. Заметьте, что результирующее движение получается здесь п р я м о л и н е й н о е. Но одно из слагающих движений (движение поезда) — равномерное. Механика учит, что в таком случае и другое составляющее движение, т. е. падение капель, должно быть тоже р а в н о м е р н ы м. Вывод неожиданный: падающее тело, движущееся равномерно! Это звучит парадоксально. Между тем, таков неизбежный вывод из прямолинейности косых линий на оконном стекле вагона; если бы капли дождя падали ускоренно, линии эти были бы кривыми (дугами парабол).

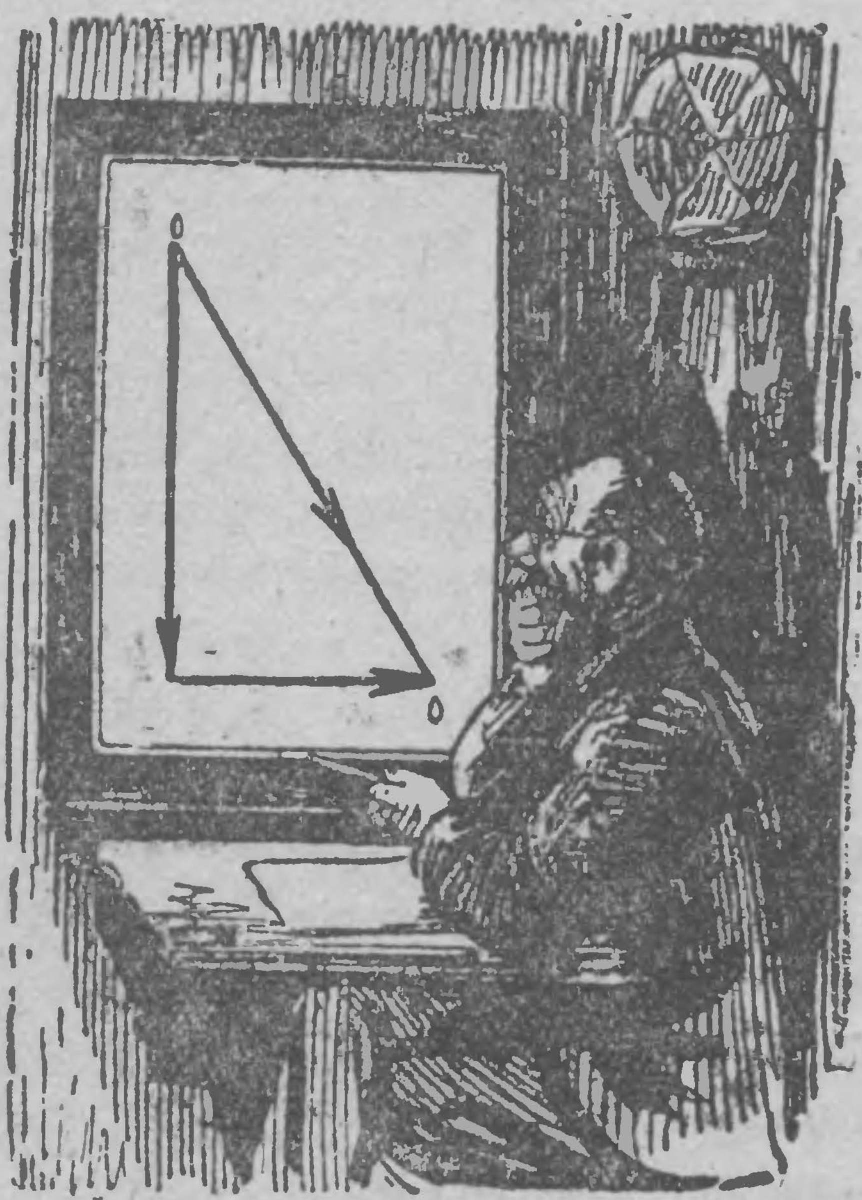


Рис. 75. Косые струи дождя в окне вагона.

Итак, дождевые капли падают не с ускорением, как уроненный камень, а равномерно. Причина та, что сопротивление воздуха нацело уничтожает силу, порождающую ускорение. Если бы этого не было, если бы воздух не задерживал падения дождевых капель, последствия были бы для нас довольно плачевны. Дождевые облака парят нередко на высоте 1—2 *км*; падая с высоты 2000 *м* в несопротивляющейся среде, капли достигли бы земной поверхности с секундной скоростью

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 2000} \approx 200 \text{ м}.$$

Это скорость револьверной пули. И хотя пули здесь не свинцовые, а только водяные, несущие с собой в 10 раз меньше кинетической энергии, все же не думаю, чтобы подобный обстрел был приятен.

С какой же скоростью дождевые капли в действительности достигают земли? Мы займемся этим, но прежде объясним, почему капли дождя движутся равномерно.

Сопротивление, испытываемое падающим телом со стороны воздуха, не остается во все время падения одинаковым. Оно растет по мере увеличения быстроты падения. В первые мгновения, пока скорость падения ничтожна [1], можно вовсе пренебречь сопротивлением воздуха. В дальнейшем скорость падения возрастает, а вместе с тем растет и сопротивление, задерживающее рост скорости [2]. Падение остается ускоренным, но величина ускорения меньше, чем при свободном падении. В дальнейшем ускорение продолжает уменьшаться и, наконец, становится равным нулю: с этого момента тело движется без ускорения, т. е. равномерно. И так как скорость не возрастает больше, то не растет и сопротивление; равномерное движение не нарушается, не переходит ни в ускоренное, ни в замедленное.

Значит, тело, падающее в воздухе, должно с некоторого момента двигаться равномерно. Для капель воды момент этот наступает очень рано. Измерения окончательной скорости дождевых капель показали, что она весьма невелика, в особенности для капель мелких. Для ка-

[1] В первую 10-ю долю секунды, например, свободно падающее тело проходит всего 5 *см*.

[2] При скорости от нескольких метров в секунду до 330 *м* (скорость звука) сопротивление воздуха растет пропорционально к в а д р а т у скорости.

пелек в 0,03 *мг* она равна 1,7 *м*, для 20 *мг* — 7 *м*, а для самых крупных, весом 200 *мг*, скорость достигает 8 *м*; большей скорости не наблюдалось.

Очень остроумен способ измерения скорости дождевых капель. Прибор (рис. 76) состоит из двух дисков, наглухо насаженных на общую вертикальную ось. Верхний

Вес капли в *мг*	0,03	0,05	0,07	0,1	0,25	3	12,4	20
Радиус в *мм*	0,2	0,23	0,26	0,29	0,39	0,9	1,4	1,7
Скорость в *м*	1,7	2	2,3	2,6	3,3	5,6	6,9	7,1

диск имеет прорез в форме узкого сектора. Прибор выносят под зонтом на дождь, приводят в быстрое вращение и убирают зонт. Капли дождя, проходя чрез прорез, падают на нижний круг, устланный пропускной бумагой. За время, в течение которого капля движется между дисками, они успевают повернуться на некоторый угол, и следы капель, упавших на нижний круг, окажутся не прямо под прорезом, а несколько позади. Пусть например, след капли оказался позади на 20-ю долю окружности, круги же делают 20 оборотов в минуту; расстояние между кругами пусть равняется 40 *см*. Нетрудно определить по этим данным скорость падения капель: капля пробегает расстояние между кругами (0,4 *м*)

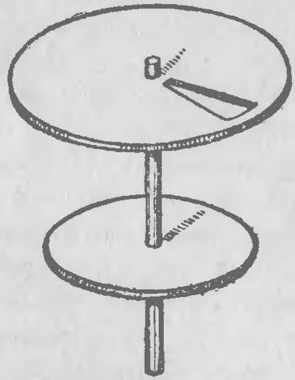


Рис. 76. Прибор для измерения скорости дождя.

в тот промежуток времени, в течение которого диск, делающий до 20 оборотов в минуту, успевает повернуться на 20-ю долю оборота. Этот промежуток времени равен

$$\frac{1}{20} : \frac{20}{60} = 0{,}15 \text{ сек.}$$

В 0,15 сек. капля прошла 0,4 *м*; значит, секундная скорость падения капли равна

$$0{,}4 : 0{,}15 = 2{,}6 \ \textit{м}.$$

(Совершенно подобным же способом может быть измерена скорость полета пули.)

Что касается в е с а капель, то он вычисляется по размеру влажных пятен, получающихся при падении капель на пропускную бумагу. Сколько миллиграммов воды всасывает 1 $см^2$ бумаги, определяют предварительно.

Градины падают с большей скоростью, чем дождевые капли. Это объясняется не тем, конечно, что градины плотнее воды (наоборот, вода плотнее), а тем, что они достигают большей величины. Но и они падают близ земли с равномерной скоростью.

Даже брошенные с аэроплана шрапнельные пули (свинцовые шарики около 1,5 *см* в диаметре) достигают земли с равномерной и довольно умеренной скоростью; поэтому они почти безвредны — неспособны пробить даже мягкую шляпу. Зато уроненные с такой же высоты железные «стрелки» представляют грозное оружие, пробивающее продольно туловище человека навылет. Объясняется это тем, что на 1 $см^2$ поперечного сечения стрелки приходится гораздо бо́льшая масса, нежели в круглой пуле; как выражаются артиллеристы, «поперечная нагрузка» стрелки значительнее, чем пули, благодаря чему стрелка успешнее преодолевает сопротивление воздуха.

ЗАГАДКА ПАДЕНИЯ ТЕЛ

Такое общеизвестное явление, как падение тел, дает нам поучительный пример резкого расхождения обыденных и научных представлений. Люди, не знакомые с механикой, убеждены в том, что тела тяжелые падают быстрее, чем легкие. Взгляд этот, восходящий к Аристотелю и всеми разделявшийся в течение длинного ряда веков, был опровергнут лишь в XVII веке Галилеем, основателем современной физики. Остроумен ход мыслей великого натуралиста, бывшего также и популяризатором: «Без опытов, путем краткого, но убедительного рассуждения мы можем ясно показать неправильность утверждения, будто тела, более тяжелые, движутся быстрее, нежели более легкие, подразумевая тела из одного и того же вещества... Если мы имеем два падающих тела, естественные скорости которых различны, и соединим движущееся быстрее с движущимся медленнее, то ясно, что движение тела, падающего быстрее, несколько задержится, а движение другого несколько ускорится. Но если это так, и если вместе с тем верно, что больший камень движется, скажем, со скоростью в восемь «градусов» (единица длины), тогда как другой, меньший — со скоростью в четыре «градуса», то соединяя их вместе, мы должны получить скорость, меньшую восьми «градусов»; однако, два камня, соединенные вместе, составляют тело, бóльшее первоначального, которое имело скорость в восемь градусов; следовательно, выходит, что более тяжелое тело движется с меньшей скоростью, чем более легкое; а это противно нашему предположению. Вы видите, что из положения, что более тяжелые тела движутся с большей скоростью, чем легкие, я мог вывести заключение, что более тяжелые тела движутся менее быстро».

Теперь мы твердо знаем, что в пустоте все тела падают с одинаковой скоростью и что причина, обусловливающая различную скорость падения тел в воздухе, есть его сопротивление. Здесь, однако, возникает недоумение такого рода: сопротивление воздуха движению зависит только от размеров и от формы тела; казалось бы поэтому, что два тела, одинаковые по величине и по форме, но разного веса, должны падать с одинаковой скоростью: их скорости, равные в пустоте, должны одинаково уменьшиться действием воздушного сопротивления. Железный и деревянный шары одинакового диаметра должны падать одинаково быстро, — вывод, явно не отвечающий фактам.

Как выпутаться из этого конфликта теории и практики?

Воспользуемся мысленно услугами аэродинамической трубы (глава 1), поставив ее **о т в е с н о**. Железный и деревянный шары одного размера подвешены в ней и подвержены действию идущего снизу воздушного потока. Иначе говоря, мы «обратили» падение тел в воздухе. Какой же из двух шаров будет быстрее увлекаться вверх воздушным потоком? Ясно, что хотя на оба шара действуют равные силы, шары получат неодинаковые ускорения: легкий шар приобретет большее ускорение (согласно формуле $f = ma$). Применяя это к первоначальному, не обращенному явлению, мы видим, что легкий шар при падении должен **о т с т а в а т ь** от тяжелого. Другими словами, шар железный должен падать в воздухе быстрее, чем равный ему деревянный. Сказанное объясняет, между прочим, и то, почему артиллеристы придают столь большое значение «поперечной нагрузке» снаряда, т. е. той доле его массы, которая приходится на каждый $см^2$, подверженный сопротивлению воздуха (см. стр. 171).

ВНИЗ ПО ТЕЧЕНИЮ

Для многих, я уверен, будет совершенно новым и неожиданным, что плавание тел по течению реки имеет близкое сходство с падением в воздухе. Принято думать, что лодка, пущенная на реку без весел и парусов, плывет по ней со скоростью течения. Такое представление, однако, ошибочно: лодка движется быстрее течения и притом тем быстрее, чем она тяжелее. Факт этот хорошо известен опытным плотовщикам, но совершенно неизвестен многим физикам. Должен сознаться, что и сам я лишь недавно узнал про него.

Разберемся подробнее в этом парадоксальном явлении. С первого взгляда представляется непонятным, как может плывущая по течению лодка обогнать несущую ее воду. Но надо иметь в виду, что река несет лодку не так, как лента конвейера переносит лежащие на ней детали. Вода в реке представляет собой наклонную плоскость, по которой тела самостоятельно скользят ускоренным движением; вода же вследствие трения о русло обладает установившимся равномерным движением. Ясно, что неизбежно должен наступить момент, когда плывущая с возрастающей скоростью лодка перегонит течение. С этого момента вода будет уже тормозить движение лодки, как воздух замедляет падение в нем тел. В итоге — по тем же причинам, как и в воздухе — движущееся тело приобретает некоторую окончательную скорость, которая более уже не возрастает. Чем легче плывущее в воде тело, тем раньше достигается эта постоянная скорость и тем она меньше по величине; напротив, тело тяжелое, пущенное по течению, приобретает более значительную окончательную скорость.

Отсюда следует, что, например, весло, опущенное с лодки, должно отстать от лодки, так как оно значительно легче ее. И лодка и весло будут нестись по реке быстрее течения, но тяжелая лодка опережает легкое весло. Так и наблюдается в действительности; особенно заметно это на быстро текущих реках.

У меня имеется возможность весьма наглядно иллюстрировать все, сейчас изложенное, приведя интересный рассказ, который любезно сообщен мне одним из читателей, ленинградским физиком В. Ю.:

«Я участвовал с экскурсией по Алтаю, и там мне пришлось спуститься по реке Бие — от ее истока из Телецкого озера до города Бийска — спуск занял 5 суток. Перед отправлением кто-то из экскурсантов заметил плотовщику, что нас на плоту довольно много.

« — Ничего, — возразил наш дедка, — зато быстрей поедем.

« — Как? Разве мы поплывем не со скоростью течения? — удивились мы.

« — Нет, мы поплывем быстрее течения; чем тяжелее плот, тем он быстрее плывет.

«Мы не поверили. Дед предложил нам, когда поплывем, бросить щепки с плота. Такой опыт мы проделали, — и действительно оказалось, что щепки очень быстро от нас отстают.

«Правота деда выявилась во время сплава и более эффектно.

В одном месте мы попали в водоворот. Очень долго описывали мы круги, прежде чем удалось нам из него вырваться. В самом начале нашего кружения упал с плота в воду деревянный молоток и быстро уплыл (по свободной от водоворота поверхности реки. Я. П.).

«— Ничего, — сказал дед, — мы его догоним, мы тяжелее.

«И хотя мы надолго застряли в водовороте, предсказание это сбылось.

«В другом месте мы заметили впереди нас плот; он был легче нашего (без пассажиров), и мы его быстро догнали и перегнали».

КОГДА ДОЖДЬ ПРОМОЧИТ СИЛЬНЕЕ?

Задача

В этой главе нам пришлось много беседовать о падении дождевых капель. Позволю себе поэтому в заключение предложить читателю задачу, хотя и не относящуюся прямо к теме главы, но тесно связанную с механикой падения дождя.

Практической задачей, на вид очень простой, но довольно поучительной, мы закончим эту главу.

В каком случае во время отвесного дождя вы больше промочите вашу шляпу: оставаясь неподвижно на месте или двигаясь под дождем столько же времени?

Задачу легче решить, если предложить ее в иной форме:

Дождь падает отвесно. В каком случае на крышу вагона попадет ежесекундно больше дождевой воды — когда вагон стоит или когда он движется?

Я предлагал эту задачу — в той и другой форме — разным лицам, занимающимся механикой, и получал разноречивые ответы. Одни для сбережения шляпы советовали спокойно стоять под дождем, другие, напротив, рекомендовали бежать возможно быстрее.

Какой же ответ правилен?

Решение

Будем рассматривать задачу во второй редакции — по отношению к крыше вагона.

Когда вагон неподвижен, количество дождевой воды, ежесекундно попадающей на его крышу, равно числу дождевых капель в призме, сечение S которой есть крыша вагона, а высота H — скорость отвесного падения капель (рис. 77).

Трудиее учесть количество дождевой воды, выпадающей на крышу движущегося вагона. Поступим следующим образом. Вообразим, что и движущийся вагон и вся совокупность падающих дождевых капель получили такое движение относительно земли, которое равно и противоположно первоначальному движению вагона. Тогда вагон сделается относительно земли неподвижным, капли же дождя будут совершать относительно этого неподвижного вагона двоякое движение: отвесное падение и горизонтальное перемещение навстречу вагону. Результирующая скорость будет наклонена к крыше вагона; иными словами, вагон словно окажется под косым дождем (рис. 78).

Теперь ясно, что совокупность капель, ежесекундно попадающих на крышу движущегося вагона, целиком заключается в пределах призмы, сечение S_1 которой перпендикулярно направлению дождя, а высота H_1 равна скоро-

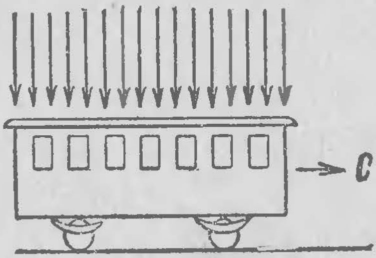


Рис. 77. Дождь, падающий отвесно на неподвижный вагон.

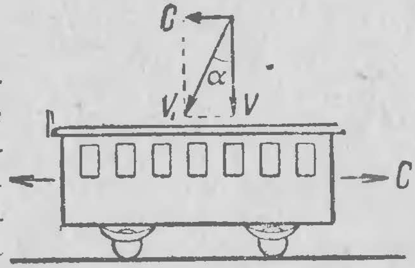


Рис. 78. То же в случае движущегося вагона.

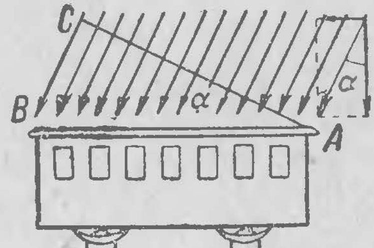


Рис. 79. Дождь, падающий на крышу движущегося вагона.

сти движения капель. Отношение сечений призмы (рис. 78)

$$\frac{S_1}{S} = \frac{AC}{AB} = \cos\alpha.$$

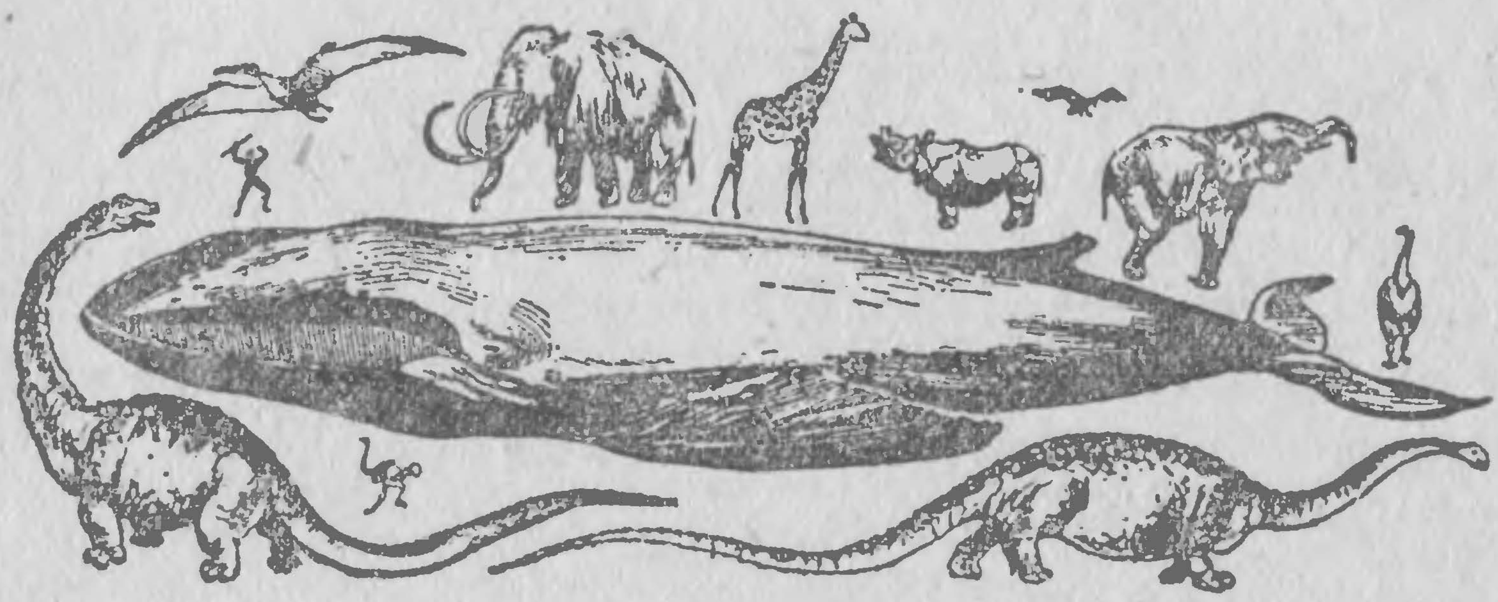
Отношение же высот призм (рис. 78)

$$\frac{H_1}{H} = \frac{v_1}{v} = \frac{1}{\cos\alpha}.$$

Отсюда отношение количеств дождевой воды:

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{S_1 H_1}{SH} = \cos\alpha \cdot \frac{1}{\cos\alpha} = 1.$$

В обоих случаях выпадает дождевой воды одинаковое количество! Ваша шляпа, следовательно, промокнет одинаково, простоите ли вы на дожде неподвижно полчаса или будете полчаса бежать под дождем.



Глава десятая

МЕХАНИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

ГУЛЛИВЕР И ВЕЛИКАНЫ

Когда вы читаете в «Путешествии Гулливера» о великанах, в 12 раз выше нормального роста, вы, конечно, представляете себе их, по крайней мере, во столько же раз более могучими. Да и сам автор «Путешествия» наделил своих «бробдиньягов» чудовищной силой. Однако это совершенно ошибочно и противоречит законам механики. Легко убедиться, что великаны не только не могли быть в 12 раз могущественнее нормального человека, но, напротив, должны были быть относительно во столько же раз слабее.

Пусть рядом стоят Гулливер и великан в 12 раз выше его. Оба поднимают вверх правую руку. Вес руки Гулливера p, великана — P. Первый поднимает центр тяжести своей руки на высоту h, второй — на H. Значит, Гулливер совершает работу ph, великан — PH. Найдем соотношение между этими величинами. Вес P руки великана больше веса p руки Гулливера во столько раз, во сколько больше ее объем, т. е. в 12^3 раз. Высота H больше h в 12 раз. Итак,

$$P = 12^3 \times p$$
$$H = 12 \times h.$$

Отсюда $PH = 12^4 ph$, т. е. для поднятия руки великан должен выполнить работу в 12^4 раз большую, нежели человек нормальных размеров. Наделен ли великан соответственно большей работоспособностью? Для этого обратимся к сравнению мускульной силы обоих существ и прежде всего прочтем относящееся сюда место из курса физиологии [1]:

«В мышце с параллельными волокнами высота, до которой поднимается тяжесть, зависит от длины волокна, вес же поднимаемого при этом груза зависит от числа волокон, так как тяжесть распределяется между ними. Поэтому из двух мышц одинаковой длины и качества бо́льшую работу производит та, которая обладает большей площадью сечения, а из двух мышц с одинаковой площадью сечения — та, которая длиннее. Если же для сравнения взяты две мышцы различной длины и площади сечения, то производимая ими работа больше для той из них, которая обладает бо́льшим объемом, т. е. содержит больше кубических единиц».

Прилагая сказанное к нашему случаю, заключаем, что способность производить работу у великана должна быть больше, чем у Гулливера, в 12^3 раз (отношение объемов мышц). Обозначив работоспособность Гулливера через w, а великана через W, имеем соотношение

$$W = 12^3 w.$$

Значит, великан, поднимая свою руку, должен выполнить работу в 12^4 раз большую, чем Гулливер, а рабо-

---

[1] «Учебник физиологии» Фостера

тоспособность его мускулов превышает гулливерову только в 12^3 раз. Ясно, что ему в 12 раз труднее выполнить это движение, чем Гулливеру. Другими словами, великан относительно в 12 раз слабее Гулливера; для одоления одного великана понадобилась бы армия не из 1728 (т. е. 12^3) нормальных людей, а только из 144.

Если Свифт желал, чтобы его великаны были столь же свободны в своих движениях, как и люди нормального роста, он должен был наделить «бробдиньягов» мускулами, объем которых в 12 раз больше, чем требует пропорциональность. Для этого они должны иметь поперечник в $\sqrt{12}$, т. е. примерно в $3\frac{1}{2}$ раза больше, чем в теле пропорционально сложенного человека. К тому же и кости, несущие такие утолщенные мышцы, должны быть соответственно массивнее. Думал ли Свифт, что созданные его воображением великаны по тяжеловесности и неуклюжести должны походить на бегемотов?

ПОЧЕМУ БЕГЕМОТ НЕУКЛЮЖ?

Бегемот не случайно пришел мне на ум. Массивность и громоздкость этого животного легко объяснить сказанным в предыдущей статье. В природе не может быть существа, которое при крупных размерах отличалось бы грациозностью. Сравним бегемота (4 *м* длины) с мелким грызуном леммингом (15 *см* длины). Наружные формы их тела приблизительно подобны. Но мы уже убедились, что животные, геометрически подобные, не могут обладать одинаковой свободой движений. Если бы мускулы бегемота были геометрически подобны мускулам лемминга, бегемот был бы относительно слабее лемминга в

$$\frac{400}{15} = 27 \text{ раз.}$$

Чтобы сравниться с леммингом в подвижности, мускулы бегемота должны быть в 27 раз объемистее сверх того, что требует пропорциональность, а, значит, поперечник их — в $\sqrt{27}$, т. е. в 5 раз больше. Соответственно толще должны быть и кости, служащие опорой таким мускулам. Теперь понятно, почему бегемот так неуклюже толстомяс

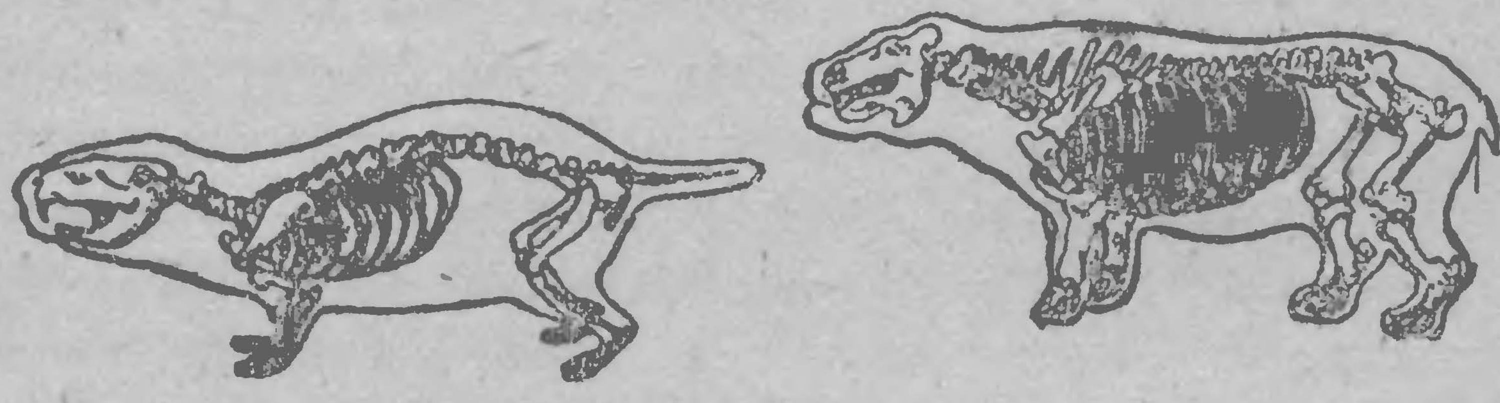


Рис. 80. Скелет бегемота (направо), сопоставленный со скелетом лемминга, причем кости бегемота по длине уменьшены до размеров костей этого грызуна. Бросается в глаза непропорциональная массивность костей бегемота.

и обладает таким массивным скелетом. Рис. 80, на котором представлены в одинаковых размерах скелет и наружные очертания обоих животных, наглядно убеждает в сказанном. Следующая таблица подтверждает, что в животном мире наблюдается общий закон, в силу которого чем крупнее животное, тем больший процент его веса составляет скелет.

Млекопитающие	Вес скелета	Птица	Вес скелета
Землеройка	8%	Королек	7%
Домашняя мышь . .	8,5%	Домашняя курица . .	12%
Кролик	9%	Гусь	13,5%
Кошка	11,5%		
Собака (средн. разм.)	14%		
Человек	18%		

СТРОЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЖИВОТНЫХ

Многие особенности строения наземных животных находят себе естественное объяснение в том простом механическом законе, что работоспособность конечностей пропорциональна 3-й степени их длины, а работа, необходимая для управления ими, — 4-й степени. Поэтому, чем крупнее животное, тем короче его конечности — ноги, крылья, щупальцы. Длинные конечности мы видим только у самых мелких из наземных животных. Всем известный паук-сенокосец может служить примером таких длинноногих существ. Законы механики не препятствуют существованию подобных форм, пока размеры их весьма невелики. Но такое же животное при величине, скажем, с лисицу было бы механически невозможно: ноги не выдержали бы груза туловища и лишены были бы подвижности. Только в океане, где вес животного уравновешивается выталкивающим действием воды, могут существовать подобные животные формы; например, глубоководный краб макрохейра при поперечнике тела полметра обладает ногами в 3 *м* длины.

Действие того же закона сказывается и при развитии отдельных животных. Конечности взрослой особи всегда короче, чем у зародыша; рост туловища обгоняет рост конечностей, благодаря чему устанавливается надлежащее соотношение между мускулатурой и работой, необходимой для перемещения.

Этими интересными вопросами первый занимался Галилей. В своей книге «Беседы о двух новых отраслях науки», где заложены были основы механики, он уделяет место таким темам, как животные и растения чрезмерной величины, «кости великана и морских животных», возможная величина водяных животных и т. п. Мы еще вернемся к этому в конце главы.

СУДЬБА ВЫМЕРШИХ ЧУДОВИЩ

Итак, законы механики ставят некоторый предел размерам животных. Увеличивая абсолютную силу животного, крупный рост либо уменьшает его подвижность, либо же обусловливает несоразмерную массивность его мышц и скелета. То и другое ставит животное в невыгодные

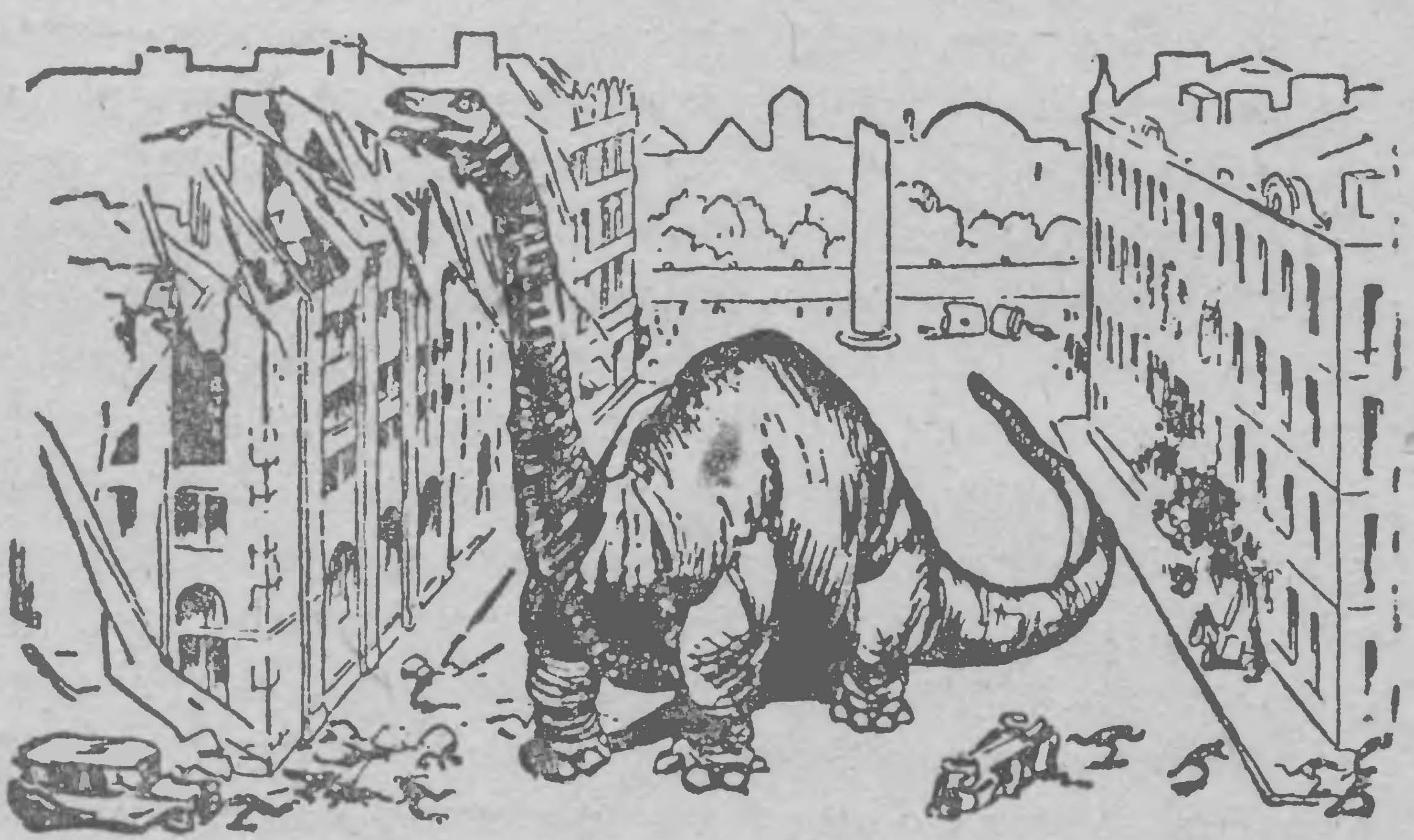


Рис. 81. Исполин древних геологических эпох, перенесенный на улицу современного города.

условия по отношению к добыванию пищи. Потребность в пище растет с увеличением размеров животного, возможность же ее добывания при этом уменьшается (пониженная подвижность). Начиная с некоторой величины животного, потребность его в пище, наконец, превышает способность к ее добыванию. Такой вид обрекается на вымирание. И мы видим, как исполинские животные древних геологических эпох действительно одно за другим сходят с арены жизни. Из всего разнообразия форм, созданных природой в крупном масштабе, лишь немногие дожили до наших дней. Наиболее крупные — например исполинские пресмыкающиеся — оказались нежизнеспособными. В числе причин, обусловивших вымирание исполинов древней истории Земли, сейчас указанные законы механики занимали одно из самых видных мест. Кит не может итти в счет: он живет в воде, в условиях невесомости, и все сейчас сказанное к нему не относится (см. заставку к главе 10).

Можно поставить вопрос: если большие размеры так невыгодны для жизни организма, то почему эволюция не шла в направлении измельчания животных форм? Причина та, что крупные формы все же а б с о л ю т н о сильнее мелких, хотя и слабее их относительно. Обращаясь снова к образам из «Путешествия Гулливера», мы видим, что хотя великану в 12 раз труднее поднять свою руку, чем Гулливеру, груз, поднимаемый исполином, в 1728 раз больше; уменьшив этот груз в 12 раз, т. е. сделав его посильным для мускулов великана, мы будем все же иметь груз в 144 раза больший, чем посильный Гулливеру. Теперь понятно, что в борьбе крупных животных форм с мелкими у первых имеется заметное преимущество. Но выгодный при схватках с врагами большой рост ставит животное в неблагоприятные условия в других отношениях (добывание пищи).

КТО ЛУЧШЕ ПРЫГАЕТ?

Многих изумляет прыжок блохи (до 40 *см*), чуть не в сотню раз превосходящий ее рост; нередко высказывают мнение, что человек мог бы состязаться с блохой лишь в том случае, если бы способен был подпрыгивать на высоту $1{,}7 \times 100$, т. е. на 170 *м*.

Механический расчет восстанавливает репутацию человека. Для простоты будем считать тело блохи геометрически подобным телу человека. Если блоха весит

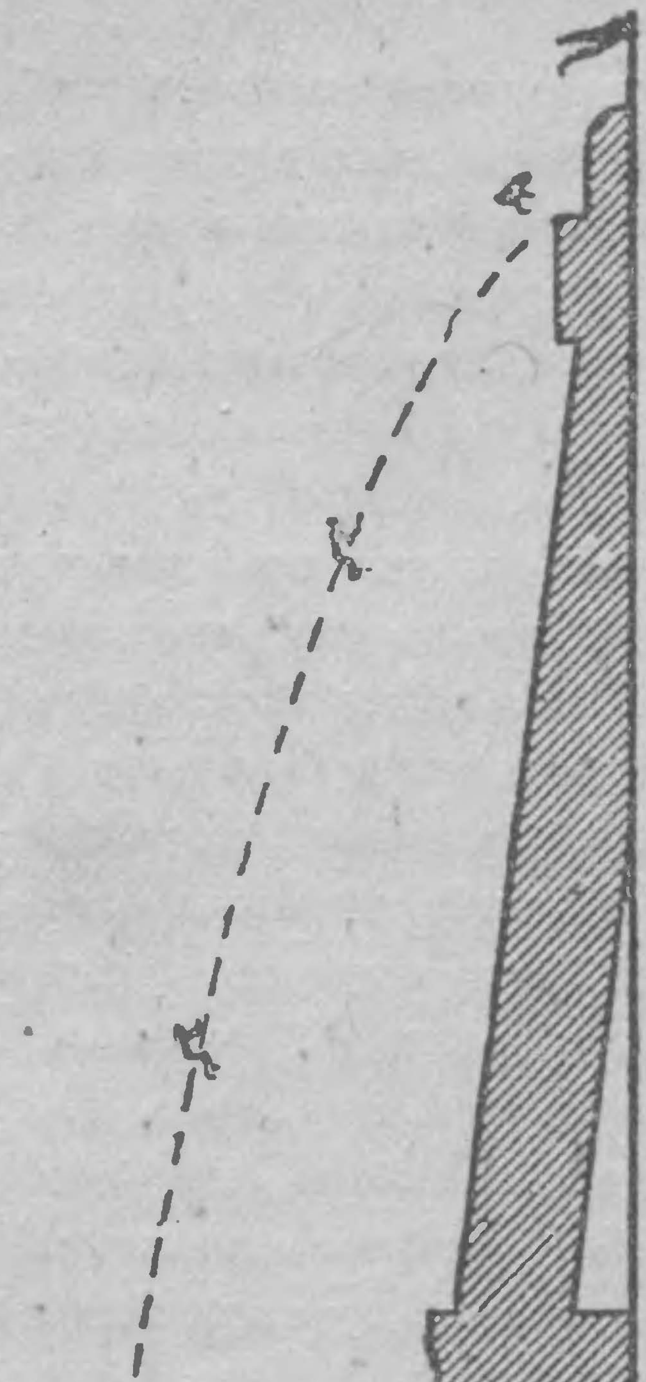


Рис. 82. Если бы человек прыгал, как блоха...

p *кг* и подпрыгивает на h *м*, то она совершает при каждом прыжке ph *кгм* работы. Человек же совершает при прыжке PH *кгм*, если P — вес его тела, а H — высота его прыжка (вернее — высота подъема его центра тяжести). Так как человек примерно раз в 300 выше блохи, то вес его тела можно принять равным 300^3p, и, следовательно, работа прыжка человека равна 300^3pP. Это больше работы блохи в

$$300^3 \frac{H}{h} \text{ раз.}$$

Способность производить работу мы должны считать у человека в 300^3 больше, чем у блохи (см. стр. 180). Поэтому мы в праве требовать у него затраты энергии лишь в 300^3 большей. Но если

$$\frac{\text{работа человека}}{\text{работа блохи}} = 300^3,$$

то должно существовать равенство:

$$300^3 \cdot \frac{H}{h} = 300^3, \text{ откуда } H = h.$$

Следовательно, человек сравнится с блохой в искусстве прыгать даже в том случае, если поднимет центр тяжести своего тела на одинаковую с ней высоту, т. е. сантиметров на 40. Подобные прыжки мы делаем без напряжения, и, следовательно, нисколько не уступаем блохе в искусстве прыгать.

Если этот расчет покажется вам недостаточно убедительным, вспомните, что, подпрыгивая на 40 *см*, блоха поднимает только свой ничтожный вес. Человек же поднимает груз в 300^3, т. е. в 27 000 000 раз больший. Двадцать семь миллионов блох, прыгающих одновременно, подняли бы совместно груз, равный весу человеческого тела. Только такой прыжок — армии из 27 000 000 блох — и надо сравнивать с прыжком одного человека. И тогда сравнение окажется несомненно в пользу человека, так как он может прыгнуть выше 40 *см*.

Становится понятным теперь, почему с уменьшением размеров животного растет относительная величина его прыжков. Если прыжки животных, одинаково приспособленных (по устройству задних конечностей) к прыганью, сопоставим с размерами их тела, то получим такие цифры:

$$\left.\begin{array}{lll} \text{Кузнечик прыгает на} & 30 \\ \text{Тушканчик} \quad „ \quad „ & 15 \\ \text{Кенгуру} \quad „ \quad „ & 5 \end{array}\right\} \text{— кратную длину тела.}$$

КТО ЛУЧШЕ ЛЕТАЕТ?

Если мы желаем правильно сравнивать способность различных животных к летанию, мы должны помнить, что действие удара крыла обусловлено сопротивлением воздуха; последнее же, при равных скоростях движения крыла, зависит от величины его поверхности. Эта поверхность, при увеличении размера животного, растет пропорционально **второй** степени линейного увеличения, поднимаемый же груз (вес тела) возрастает пропорционально **третьей** степени линейного увеличения.

Нагрузка на 1 $см^2$ крыла поэтому повышается с увеличением размеров летуна. Орлы страны великанов (в «Путешествии Гулливера») должны были нести на 1 $см^2$ своих крыльев 12-кратный груз по сравнению с обыкновенными орлами и были, конечно, гораздо худшими летунами, нежели миниатюрные орлы страны лиллипутов, несшие нагрузку в 12 раз меньше нормальной.

Рис. 83. Страус рядом со скелетом вымершей мадагаскарской птицы — эпиорниса. Слева для сравнения — курица.

Переходя от воображаемых животных к реальным, приведем следующие числовые данные о нагрузке, приходящейся на 1 $см^2$ крыльев (в скобках — вес животного):

Насекомые

Стрекоза (0,9 *г*)	0,04 *г*
Бабочка-шелкопряд (2 *г*)	0,1 „

Птицы

Береговая ласточка (20 *г*)	0,14 *г*
Сокол (260 *г*)	0,38 „
Орел (5000 *г*)	0,63 „

Мы видим, что чем крупнее летающее животное, тем большая нагрузка приходится на 1 $см^2$ его крыльев. Ясно, что для увеличения тела птицы должен существовать предел, превзойдя который птица не может уже поддерживать себя крыльями в воздухе. И не случайность, что самые крупные птицы лишены способности летать. Такие исполины пернатого мира, как казуар, достигающий человеческого роста, страус (2,5 *м*) или еще более крупная вымершая мадагаскарская птица эпиорнис[1] (5 *м*) неспособны летать; летали лишь их отдаленные менее крупные предки, впоследствии, из-за недостатка упражнения, утратившие эту способность и вместе с тем получившие возможность увеличить свой рост.

БЕЗВРЕДНОЕ ПАДЕНИЕ

Насекомые безнаказанно падают с такой высоты, с какой мы не решились бы спрыгнуть. Спасаясь от преследования, иные из этих животных сбрасывают себя с веток высокого дерева и падают на землю совершенно невредимо. Чем это объяснить?

Когда ударяется о препятствие тело небольшого объема, то прекращают свое движение почти сразу все его частицы; одни части тела поэтому при ударе не давят на другие. Другое дело — падение крупного тела: когда нижние его части прекращают при ударе свое движение, верхние еще продолжают двигаться и оказывают на нижние сильное давление. Это и есть то «сотрясение», которое гибельно для организма крупных животных. 1728 лиллипутов, упав с дерева рассыпным дождем, пострадали бы мало; но если бы те же лиллипуты упали плотным комом, то расположенные выше раздавили бы нижних. Человек нормального роста представляет собой словно ком из 1728 лиллипутов.

Такова первая причина безвредности падения мелких существ. Вторая кроется в большей гибкости их частей. Чем стержень или пластинка тоньше, тем больше сги-

[1] По новейшим исследованиям этот вид еще жил на Земле в начале XVII века.

баются они под действием силы. Насекомые по линейным размерам в сотни раз меньше крупного млекопитающего; поэтому, — как показывают формулы учения об упругости, — части их тела во столько же раз больше сгибаются при ударе. А мы уже знаем, что если удар поглощается на пути в сотни раз более длинном, то и разрушительное его действие во столько же раз ослабляется.

ПОЧЕМУ ДЕРЕВЬЯ НЕ РАСТУТ ДО НЕБА?

«Природа позаботилась о том, чтобы деревья не росли до неба», — говорит немецкая пословица. Рассмотрим, как осуществляется эта «забота».

Вообразим древесный ствол, прочно выдерживающий собственный вес, и пусть линейные его размеры увеличились в 100 раз. Объем, а следовательно, и вес ствола возрастет при этом в 100^3, т. е. в 1 000 000 раз. Сопротивление же ствола раздроблению, зависящее от площади его сечения, увеличится только в 100^2, т. е. в 10 000 раз. На каждый $см^2$ сечения ствола придется тогда 100-кратная нагрузка. Ясно, что при известном увеличении роста дерево — если только оно остается геометрически подобным самому себе — должно собственным весом раздробить свое основание [1]. Чтобы уцелеть, высокое дерево должно быть непропорционально толще низкого. Но увеличение толщины увеличивает, конечно, вес дерева, т. е. в свою очередь увеличивает нагрузку на основание. Значит, должна существовать для дерева такая предельная высота, при которой дальнейшее увеличение ее становится невозможным, — дерево ломается. Вот почему деревья «не растут до неба».

---

[1] Кроме случая, когда ствол, утоньшаясь кверху, имеет форму так называемого «бруса равного сопротивления».

Нас поражает необыкновенная прочность соломины, достигающей, например, у ржи $1\frac{1}{2}$ *м* высоты при ничтожной толщине 3 *мм*. Самое стройное сооружение строительного искусства — труба одного из заводов близ Фрейберга — достигает 140 *м* высоты при среднем поперечнике 5,5 *м*. Ее высота всего в 26 раз превышает толщину, между тем как для стебля ржи это отношение равно 500. Здесь нельзя, однако, видеть доказательство того, что произведения природы неизмеримо совершеннее произведений человеческого искусства. Расчет показывает (мы не приводим его здесь ввиду сложности), что если бы природе понадобилось создать ствол в 140 *м* высоты по типу ржаной соломины, то поперечник его должен был бы быть около 3 *м*: только тогда ствол обладал бы прочностью стебля ржи. Это мало отличается от того, что достигнуто человеческой техникой.

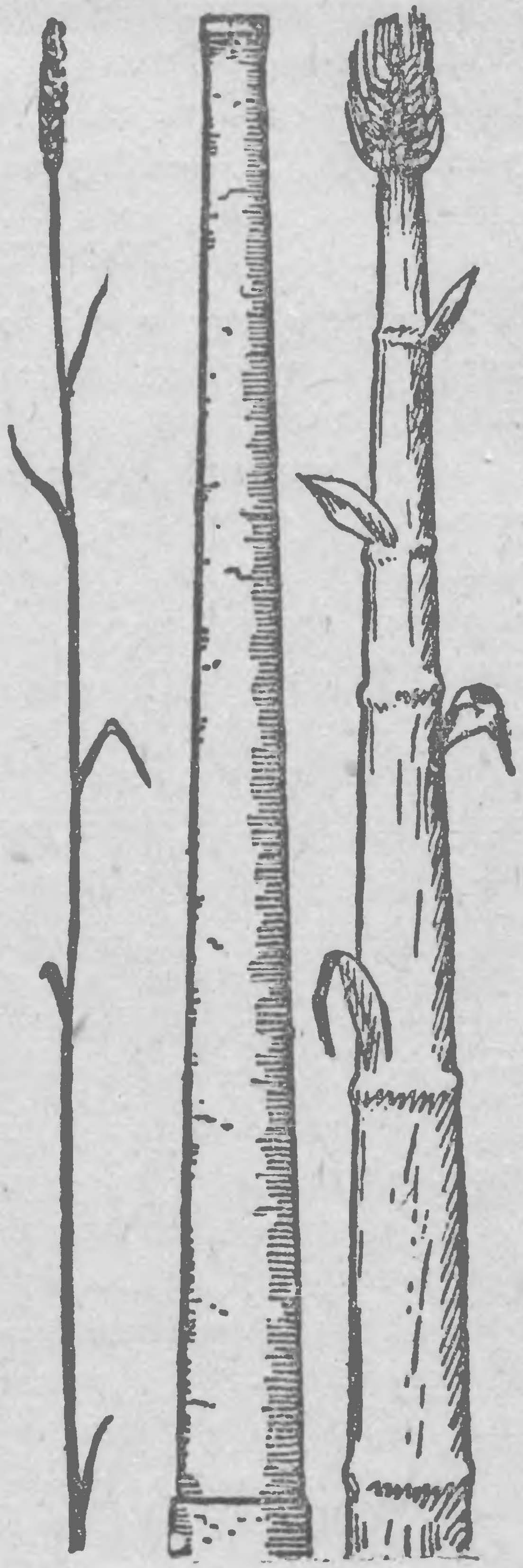


Рис. 84. Стебель ржи (*a*), заводская труба (*b*) и воображаемый стебель в 140 *м* высоты (*c*).

Непропорциональное утолщение растительных форм с увеличением их высоты легко проследить на ряде примеров. Если стебель ржи ($1\frac{1}{2}$ *м*) превышает его толщину в 500 раз, то у бамбука (30 *м*) это отношение равно 130, у сосны (40 *м*) — 42, у эвкалипта (130 *м*) — 28.

ИЗ КНИГИ ГАЛИЛЕЯ

Закончим эту часть книги отрывком из сочинения основателя механики Галилея: «Беседы о двух новых отраслях науки».

«Сальвиати. Мы ясно видим невозможность не только для искусства, но и для самой природы беспредельно увеличивать размеры своих творений. Так, невозможна постройка судов, дворцов и храмов огромнейшей величины, коих весла, мачты, балки, железные скрепы, словом все части держались бы прочно. С другой стороны, и природа не может произвести деревьев несоразмерной величины, так как ветви их, отягченные собственным чрезвычайным весом, в конце концов, сломались бы. Равным образом невозможно представить себе костяка человека, лошади или другого живого существа слишком большой величины, который держался бы и соответствовал своему назначению; достигнуть чрезвычайной величины животные могли бы только в том случае, если бы вещество их костей было значительно прочнее и крепче, нежели обычное, или же если бы кости их изменились, соразмерно увеличившись в толщину, отчего животные по строению и виду производили бы впечатление чрезвычайной толщины. Это уже было подмечено проницательным поэтом (Ариостом в «Неистовом Орланде»), который, описывая великана, говорит:

> Огромный рост его так члены утолщает,
> Что вид чудовища они ему дают.

«В качестве примера только что сказанного я покажу вам сейчас рисунок кости, удлиненной только в три раза, но увеличенной в толщину в такой мере, чтобы она могла служить для большего животного с той же надежностью, как меньшая кость служит для животного малого размера. Вы видите, какой несообразно толстой выглядит такая увеличенная кость. Отсюда ясно, что тот, кто желал бы сохранить в огромном великане пропорцию членов обыкновенного человеческого тела, должен был бы найти для построения костей какое-либо иное, более удобное и прочное вещество, или же должен был бы примириться с тем, чтобы большое тело обладало крепостью сравнительно меньшей, чем тело человека обычной величины; увеличение размеров до чрезвычайной величины имело бы следствием то, что тело было бы раздавлено и сломано тяжестью своего собственного веса. Обратно, мы видим, что, уменьшая размеры тел, мы не уменьшаем в той же пропорции их прочности; в телах меньших замечается даже относительное увеличение ее; так, я думаю, что небольшая собака может нести на себе двух или даже трех таких же собак, в то время как лошадь едва ли может нести на спине одну только другую лошадь, равную ей по величине.

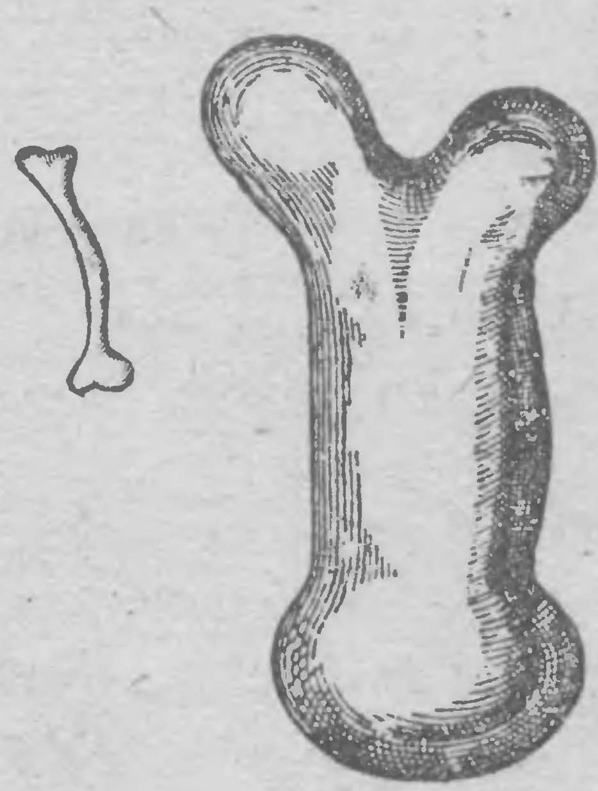


Рис. 84а.

«Симпличио. У меня есть достаточный повод сомневаться в справедливости сказанного вами, а именно, огромная величина тела, встречаемая у рыб, так, например, кит[1] равен по величине, если я не ошибаюсь, десяти слонам, и однако же тело его все же держится.

---

[1] В эпоху Галилея кита причисляли к рыбам. В действительности кит — млекопитающее, дышащее легкими; тем поучительнее тот факт, что кит — животное водное

«С а л ь в и а т и. Ваше сомнение, синьор Симпличио, заставляет меня припомнить еще одно упущенное мной сначала из виду условие, при котором великаны и прочие огромные существа могут жить и двигаться не хуже малых животных. Вместо того, чтобы увеличивать толщину и прочность костей и других частей, предназначенных для поддержания собственного веса и веса прилегающих частей тела, можно, оставив строение и пропорцию костей прежними, уменьшать в значительной мере вес материи как самих костей, так и частей тела, к ним прилегающих и ими поддерживаемых. По этому второму пути и пошла природа в творении рыб, сделав кости и части тела не только легкими, но и вовсе лишенными веса.

«С и м п л и ч и о. Хорошо вижу, к чему клонится ваша речь, синьор Сальвиати. Вы хотите сказать, что так как местопребыванием рыб является вода, которая в силу своей тяжести отнимает вес у погруженных в нее тел, то материя, из коей состоят рыбы, теряя в воде вес, может держаться, не обременяя костей. Однако, этого для меня недостаточно, ибо хотя и можно предположить, что к о с т и р ы б н е о т я г о щ а ю т с я телом, но материя этих костей, конечно, имеет вес. Кто же может утверждать, что ребро кита, величиною с добрую балку, не имеет достаточного веса и не пойдет ко дну в воде. По вашей теории тéла такого большого размера, как у кита, не должно было бы существовать.

«С а л ь в и а т и. Чтобы лучше возразить на ваши доводы, я сначала предложу вам вопрос: видели ли вы когда-нибудь рыб в спокойной и неподвижной воде не опускающимися ко дну, не поднимающимися на поверхность и не делающими никаких движений?

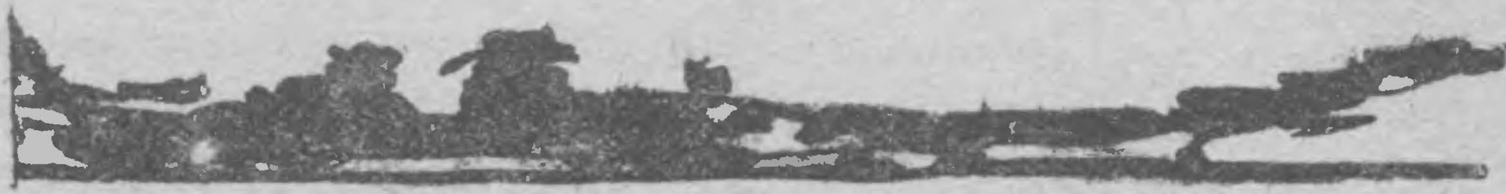
«С и м п л и ч и о. Это всем известное явление.

«С а л ь в и а т и. Но если рыбы могут пребывать в воде без всякого движения, то это является неоспоримым доказательством того, что вся совокупность объема их тела равна по удельному весу воде; а так как в их теле существуют части более тяжелые, нежели вода, то необходимо придти к заключению, что есть и другие части, которые легче воды и создают равновесие. Так как кости являются более тяжелыми, то мясо или другие какие-либо органы должны быть легче воды, и они-то своей легкостью отнимают вес у костей. Таким образом в воде имеет место совершенно обратное тому, что мы видим у наземных животных: в то время как у последних кости должны нести свой вес и вес мяса, у водяных животных мясо поддерживает не только свой вес, но и вес костей. Таким образом нет ничего чудесного в том, что огромнейшие животные могут существовать в воде, но не на земле, т. е. в воздухе.

«Сагредо. Мне очень понравились рассуждения синьора Симпличио, вопрос, ими возбужденный, и разрешение последнего. Я заключаю из них, что если вытащить на берег одну из таких огромных рыб, то она не сможет долгое время держаться, так как связь между костями ее должна скоро порваться, и тело разрушится» [1].

---

[1] См. об этом в моей книге «Физика на каждом шагу» статью «Почему киты живут в море?» — *Я. П.*



Глава одиннадцатая

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ПРОГУЛКА В СТРАНУ ЭЙНШТЕЙНА

Очерк О. А. Вольберга

ВСТУПИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Имеется много прекрасных книг, в которых теория относительности излагается более или менее общедоступно. Но, надо сказать правду, эти книги немногим принесли действительную пользу.

Популяризаторы теории относительности обычно связывают крепко читателя логическими доводами и влекут покорным пленником в страну Эйнштейна. Понять эти доводы нетрудно, но принять выводы, которые отсюда проистекают, читатель все-таки не может. Логика увлекает мысль в новый мир, а слабое воображение останавливается бессильно на его пороге.

Наши понятия и представления сложились под влиянием тех обыденных фактов, среди которых мы живем. Эйнштейн утверждает, что эти понятия и представления соответствуют фактам только приближенно. Ответственной за такое несовпадение является грубость нашего восприятия: мы не замечаем некоторых изменений, которые происходят в действительности. Если бы изменения эти были более значительны, мы обнаружили бы их, — и тогда представление наше о мире было бы существенно иным.

Вообразим страну, где все происходит, как в нашем мире, но где особенности, о которых говорит Эйнштейн, выступают более отчетливо.

Перенесемся на время в эту страну, поживем там среди новых фактов, научимся смотреть на вещи глазами коренных ее обитателей. Это лучший способ усвоить те новые понятия и представления, которые составляют сущность теории относительности.

Таково будет содержание этой главы: мы намерены изучить теорию относительности экскурсионным методом. Но прежде чем явиться в страну Эйнштейна, полезно заглянуть в другой мир, в некоторых отношениях более простой. Короткая остановка здесь подготовит нас к вступлению в «землю обетованную».

I. МИР НОМЕР ПЕРВЫЙ

1. Необычайные приключения мистера Гарвуда

Прямое, как стрела, широкое и ровное шоссе позволяло моему лимузину развить скорость километров в 70. Я рассчитывал за два часа проделать путь до столицы, где должен был видеться с профессором N, назначившим мне свидание ровно в три. Было около полудня, и в моем распоряжении оставалось достаточно времени. Вещи были уложены на автомобиле. Мистер Барнэй — добродушный хозяин гостиницы, в которой я жил, — любезно проводил меня и сказал:

— До свидания, мистер Гарвуд. Возвращайтесь поскорее. О продовольствии на дорогу я позаботился. Вы найдете все необходимое в этой корзине.

Корзина была внушительных размеров. Двухчасовая прогулка, как видно, представлялась этому добряку настоящим путешествием.

— В два часа я буду в столице, — возразил я. — До трех я свободен и успею пообедать. Ваши хлопоты о провизии, право, совершенно излишни.

— Да, разумеется, — ответил он, как мне показалось, с некоторым удивлением, — в городе вы успеете пообедать вторично. В корзинку я положил лишь скромный дорожный обед: хлеб, жареную телятину, бутылку молока, фрукты. Бензина у вас достаточно: наполнены оба бака.

Чудак, считавший меня способным дважды обедать в течение трех часов, преувеличивал аппетит и моего автомобиля. Но не хотелось спорить. Поблагодарив и откланявшись, я тронулся в путь.

Было ровно 12. Тихо, солнечно, сухо, но не жарко. Прекрасная погода для поездки. Мотор работал отлично. Но странное дело: мне почудилось, что я еду не так быстро, как ожидал. Измеритель скорости показывал 75 *км*, я чувствовал привычный ветер от рассекаемого воздуха, но не было мелькания дороги, а окрестности как-то слишком медленно уходили назад. Первый километр показался мне ужасно длинным. Я стал присматриваться. Машина работала прекрасно, и все-таки окрестности медленно ползли мимо меня. Казалось, кто-то растянул дорогу с садами, домами, полями и километрами.

К часу дня не проехал и 30 *км*. Нечего было и думать поспеть во-время на свидание. Сбитый с толку, сидел я в лимузине, тщетно стараясь понять, что происходит. В три часа я почувствовал голод и вспомнил о хозяине, который словно предвидел мое непонятное приключение.

В 5 часов вечера я начал опасаться, что нехватит бензина. Наконец, вдали показался город. Было около 6 часов, когда я подъехал к гостинице, где заранее была заказана комната и обед. Никто не осведомился о причине моего опоздания. Мало того, хозяин извинился, что обед не готов.

— Мы ждали вас к двум, — сказал он. — Вы приехали немного раньше.

— Раньше?! Теперь без 10 минут шесть.

Я протянул ему часы. Он осмотрел их и сказал совершенно серьезно:

— Прекрасные часики; у них, должно быть, очень точный ход. Вы выехали в 12?

— Да...

— Теперь без пяти минут 2. Вы делали 75 *км/час.*

Затем этот чудак (неужели все содержатели гостиниц чудаки?) подошел к какому-то чертежу на стене, приложил линейку, что-то отмерил и сказал:

— Да, совершенно точный ход.

Это относилось к моим часам и было произнесено без тени иронии. Переставив стрелки, он вернул мне часы.

Пообедав вторично с изрядным аппетитом, я отправился на свидание к профессору, который выразил удовольствие по поводу моей аккуратности.

Ничего не понимая, я вернулся в гостиницу.

Мои дела в столице были закончены, и я решил, несмотря на усталость, немедленно ехать назад.

— Мы ничего не приготовили вам на дорогу, — сказал хозяин гостиницы. — Будьте любезны подождать несколько минут.

— Отпустите, пожалуйста, бензин для автомобиля, провизии мне не нужно, — ответил я.

Увы! В дороге пришлось пожалеть об этом легкомысленном заявлении.

Обратное путешествие как две капли воды походило на утреннее. Снова дорога казалась растянутой. Время тянулось страшно медленно. Навстречу попался крестьянин с телегой. Меня поразил его вид: лошадь была непомерно длинна, возница сначала показался мне довольно худощавым. но когда, проезжая мимо, я взглянул на него сбоку, то видно было, что он каррикатурно толст от груди к спине и непомерно узок в плечах. Колеса имели эллиптическую форму, казались сплюснутыми сверху вниз и отличались непостижимой гибкостью, так что, катясь, оставались все время сплюснутыми (см. заставку). Случайные прохожие были так же уродливы, как этот крестьянин, и напоминали отражения в кривом зеркале или изуродованные детские игрушки.

В семь часов вечера я проехал только полдороги. Усталость и голод мучили меня. Напрасно обыскал я корзинку, где утром лежали припасы, в надежде найти завалявшийся ломоть хлеба. Ничего не осталось, кроме бутылки скисшего молока.

На моих часах было уже 10, когда я подъехал к гостинице. Однако еще не начинало темнеть. Часы в гостинице показывали 6, так что мне вторично пришлось переставить стрелки назад. Пока мне стряпали обед (третий в этот день), мистер Барнэй принес горшок молока и большой ломоть хлеба.

— Это вечернее молоко? — спросил я, с жадностью откусывая хлеб и запивая большими глотками.

— Коровы еще не вернулись; молоко утреннее.

— А мое молоко, знаете, скисло, — сказал я. — Не пришлось выпить его на обратном пути. Странно, ведь сегодня не жарко.

— Что тут странного? Ему теперь часов двадцать.

— Вы разве дали мне вчерашнее молоко?

— Нет, то молоко одного удоя с этим.

— А этому сколько времени?

— Часов двенадцать.

— Но если одного удоя, то почему мое старше?

— Постарело в дороге.

Опять загадка — одна из тех, которые преследовали меня весь день. Однако я слишком устал, чтобы пытаться сейчас распутать всю цепь странных происшествий, и переменил разговор.

2. Мистер Гарвуд ищет разгадку

На следующий день я долго ломал голову над тем, что произошло накануне.

Усталость и необычайный аппетит можно было приписать дороге и непривычному климату. Колоссальный расход бензина — два бака за два часа? Где-то есть течь, или мотор не в порядке. Необычайный вид дороги и людей на ней? Галлюцинация, последствие усталости. Но часы... Как объяснить их изумительный ход? Повреждение механизма? Я вынул свои часы и сверил их со стенными. Сегодня они шли правильно. Повреждение, которое излечилось само собой! Ну, а как понять удивительные разговоры с содержателями гостиниц? Считать их чудаками? Мистер Барнэй, конечно, шутил насчет молока. Я представил себе этого добродушного, положительного толстяка. В нем много смешного, но ни капли юмора...

Мне захотелось еще раз увидеть этого странного человека, чтобы переговорить на-чистую.

— Здравствуйте, мистер Барнэй, — сказал я, входя в столовую.

Он поднял голову, вскинул на лоб огромные очки в черепаховой оправе и приветствовал меня своей пухлой ручкой с короткими пальцами.

— Как чувствуете себя после вчерашнего путешествия?

— Ну, какое там путешествие! Двухчасовая прогулка...

— Двухчасовая для нас, а для вас шестичасовая. Две «прогулки» по шести часов подряд, — на это не всякий способен.

— Почему же вы считаете для себя 2 часа, а для меня 6?

— Ну, как же? Ведь вы ехали.

— У вас, я вижу, ведется двойная бухгалтерия: для домоседов и для ездящих. Это как на войне: месяц в окопах засчитывается за год службы мирного времени.

— Нет, — ответил он, даже не улыбаясь, — двойная бухгалтерия для меня слишком сложна. С меня достаточно простой записи расходов, — он указал на счета и расписки, лежавшие на столе. — Что касается окопов, то часы идут там ничуть не быстрее, чем в тылу.

Положительно, этот человек неспособен шутить!

— Кстати, о часах, — сказал я. — Вчера с моими часами произошло нечто странное: ушли вперед на 8 часов. Я два раза переставлял их. Не понимаю, в чем тут дело.

— Как же это случилось?

— Да вот, выехал я от вас в 12, приехал на место в 2; смотрю — а на часах 6. На обратном пути такая же история.

— Что же тут странного?

— Странно то, что сегодня они опять идут хорошо. Исправились сами собой.

— Но почему вы думаете, что они были испорчены?

Он сказал это самым невозмутимым тоном.

— Простите, но если часы за 2 часа уходят на 4 часа, то есть основание считать их испорченными, — сказал я.

Мистер Барнэй сдвинул свои черепаховые очки со лба на нос, затем поднял снова на лоб и окончательно опустил их на нос. Это, повидимому, означало, что толстяк взволнован. Затем, взяв чистый лист бумаги, он начертил на нем что-то и молча протянул мне.

— Вот график вашего путешествия.

Я был изумлен. Этот толстяк толкует о графиках!

— Ну, что же, — сказал я, мельком взглянув на корявый чертеж, — давайте изобразим мое путешествие графически, раз это вас интересует.

Взяв со стола лист бумаги, я стал чертить, поясняя мистеру Барнэю.

— Эти две прямые (OX и OY на рис. 85) будем считать осями координат. По оси OX будем определять расстояния, по оси OY — время. Точка O изображает собой событие, которое произошло здесь в гостинице вчера в 12 часов дня. Точка A_1—событие, которое произошло по пути в город на расстоянии 25 *км* от нас через 20 минут после 12 часов дня. Понятно?

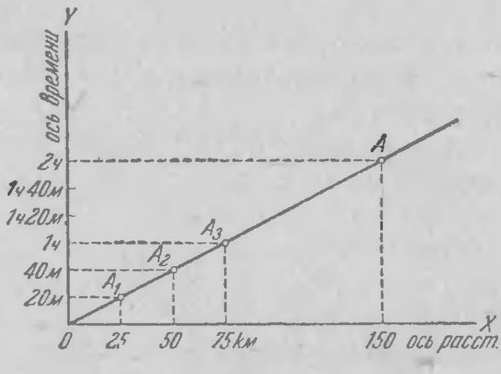


Рис. 85.

Прежде чем он собрался ответить, я продолжал:

— Точка O изображает мой отъезд отсюда. Через 20 минут я был на расстоянии 25 *км* (точка A_1). Через 40 минут — на расстоянии 50 *км* (точка A_2), через час — на расстоянии 75 *км* (точка A_3) и т. д. Все точки, изображающие меня в разные моменты, лежат на прямой AO. Точка A — мое прибытие в столицу. Прямая OA — график моего путешествия.

Мистер Барнэй взглянул на мой чертеж.

— OX у вас ось пространства для гостиницы?

— Да, вдоль этой прямой я отсчитываю расстояния.

— OY — ось времени для гостиницы?

— Да, вдоль нее я отсчитываю время.

— OA — ось времени для путешественника?

Я задумался. Пожалуй, прямую OA, точки которой изображают путешественника в разные моменты, действительно можно назвать осью времени путешественника, подобно тому, как прямая OY, точки которой изображают гостиницу в разные моменты, названа осью времени гостиницы. Замечание мистера Барнэя не лишено некоторого смысла, тем более, что путешественник имеет право смотреть на дело так, будто он неподвижен, а гостиница и дорога убегают назад. С этой точки зрения прямая OY будет графиком движения гостиницы, а OA — осью времени путешественника.

— Да, — сказал я, — прямую OA можно считать осью времени путешественника.

— А где же его ось пространства?

— Ось пространства OX.

— Это для гостиницы. А я спрашиваю, где ось пространства путешественника?

— Ось пространства одна и та же, — ответил я.

Очки мистера Барнэя заходили с носа на лоб и обратно. Судя по числу передвижений, волнение толстяка было значительно.

— Вздор, — сказал он. — Оси времени разные, а ось пространства одна? Абсурд! Ось пространства всегда должна быть перпендикулярна к оси времени.

Так начался наш спор. Никто не мог предвидеть его роковых последствий. Тогда я был только удивлен странной ошибкой Барнэя, непоследовательностью, с какой он перескочил от моих часов к графику, и той бессмыслицей, которую он городил по поводу моего путешествия. Теперь я знаю, что менее всего его можно обвинить в непоследовательности. В помешательстве Барнэя была своя логика. Нелепое представление о графиках являлось центром безумия, от которого во все стороны отходили остальные нелепости. Но в то время я не подозревал, в какой надежной цитадели укрыто сумасшествие Барнэя, и с легким сердцем ввязался в спор.

3. На сцену выступает автор

Прервем здесь беседу Гарвуда и Барнэя, чтобы дать читателю необходимые пояснения относительно личности наших героев и места действия. Гарвуд самый обыкновенный человек, постоянный житель нашего мира. Характер, возраст, род занятий и точный адрес его не имеют значения. Каким-то неведомым образом Гарвуд попал в необыкновенный мир (мир № 1), устроенный по иным законам, нежели наш мир. Все приключения, которые происходят здесь с Гарвудом, объясняются особенностями мира №1.

Барнэй — содержатель гостиницы — коренной обитатель мира № 1, куда случайно попал Гарвуд.

Чтобы описать мир № 1, мы вынуждены прибегнуть к графикам. Это не совсем обычный метод описания. Но и предмет описания не обычен, и нам невозможно обойтись теми приятными методами, которыми пользуются для изображения лесных тропинок, цветистых лугов, морских пляжей и других живописных уголков природы. Изобразить целый мир можно только на сжатом и точном языке математики, так что читатель должен примириться с нашим геометрическим методом.

Графики Гарвуда — это самые обыкновенные графики, которые чертят в школе. К тому, что вы знаете о графиках, полезно добавить следующее.

Вовсе необязательно, чтобы оси координат были взаимно перпендикулярны: ничто по существу не изменится, если выбрать координатные оси наклоненными под произвольным углом.

Так, на рис. 86 изображено несколько событий, которые происходят на пути между Ленинградом и Москвой. *OX* — ось пространства, наклонная к ней прямая OY — ось времени. Точка N изображает событие, которое произошло на дороге Ленинград — Москва в 5 часов утра на расстоянии 600 *км* от Ленинграда. Событие, ко-

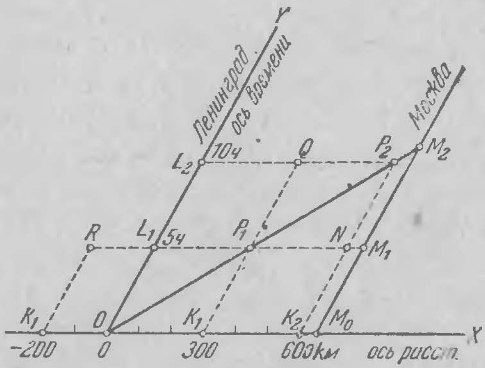


Рис. 86.

торое произошло в тот же момент времени (5 час. утра) на расстоянии 300 *км* от Ленинграда, изображено точкой P_1. Вообще, чтобы найти место и время события, изображенного некоторой точкой, нужно провести через эту точку прямые, параллельные координат-

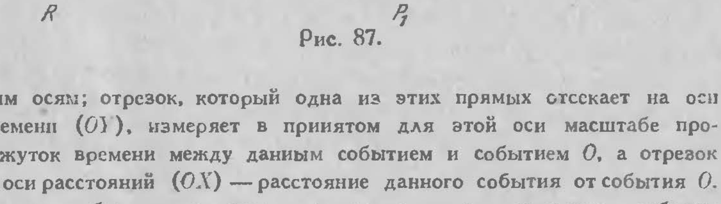


Рис. 87.

ным осям; отрезок, который одна из этих прямых отсекает на оси времени (OY), измеряет в принятом для этой оси масштабе промежуток времени между данным событием и событием O, а отрезок на оси расстояний (OX) — расстояние данного события от события O. Читатель без труда определит, когда и где случились события P_2, Q, K_1, L_1 изображенные на рисунке. Событие R, например, произошло в 5 часов утра на расстоянии — 200 *км* (минус 200 *км*) от Ленинграда. Знак «минус» указывает направление, обратное направлению на Москву (рис. 87).

События L_1, P_1, N происходят одновременно, именно в 5 часов утра. Вообще события, изображенные точками прямой, параллельной оси OX, одновременны. Точки самой оси OX изображают события, которые происходят в полночь. События, совершающиеся в одном и том же месте, изображаются точками прямой, параллельной оси OY. Точки самой оси OY (оси времени) изображают события, происходящие в Ленинграде, иначе говоря, они изображают Ленинград в разные моменты.

По нашему чертежу легко определить расстояние между двумя событиями или промежуток времени, отделяющий одно событие от другого. Например, событие N произошло на расстоянии 300 *км* от P_1 (это расстояние измеряется отрезком K_1K_2, который равен отрезку P_1, N). Тем же отрезком K_1K_2 измеряется расстояние между событиями P_1 и P_2, а также между Q и N.

Представим себе, что ровно в полночь из Ленинграда отправляется в Москву поезд, идущий со скоростью 60 *км/час*. Отправление из Ленинграда совпадает с событием O. В 5 часов утра поезд проходит мимо сторожки, расположенной на расстоянии 300 *км* от Ленинграда; это событие совпадает с событием P_1. В 10 часов утра поезд находится на расстоянии 600 *км* от Ленинграда. Событие, которое происходит в этот момент в поезде, совпадает с событием P_2, M_2 — прибытие поезда в Москву. Предложим читателю изобразить события, которые происходят в поезде в 1 час пополуночи, в 2 часа, в 3 часа и т. д. Легко убедиться, что все точки, изображающие эти события, т. е. изображающие поезд в разные моменты, расположены на одной прямой, именно на прямой OM_2. Эта прямая представляет собой график движения поезда (рис. 88).

Итак, график движения поезда есть совокупность точек, изображающих поезд в разные моменты.

Допустим, что рис. 88 вывешен в поезде; пассажиров интересует расстояние любого события не от Ленинграда, а от поезда, в котором они находятся. Как же воспользоваться нашим графиком для ответа на этот вопрос? Очень просто. Чтобы узнать, на каком расстоянии от поезда произошло, например, событие A, достаточно провести через точку A прямую, параллельную OM. Отрезок OC, который эта прямая отсекает на оси расстояний, измеряет в принятом масштабе расстояние события A от поезда. В самом деле, в момент, когда происходит событие A, поезд изображается точкой B, т. е. находится от события A на расстоянии, которое измеряется отрезком BA. Но $BA = OC$. Стало быть событие A произошло на расстоянии 300 *км* от поезда (в сторону Москвы). Таким же образом найдем, что событие D произошло на расстоянии 500 *км* от поезда (в сторону Москвы), событие E на расстоянии минус 300 *км* от поезда (300 *км* в сторону Ленинграда) и т. д. Словом, чтобы

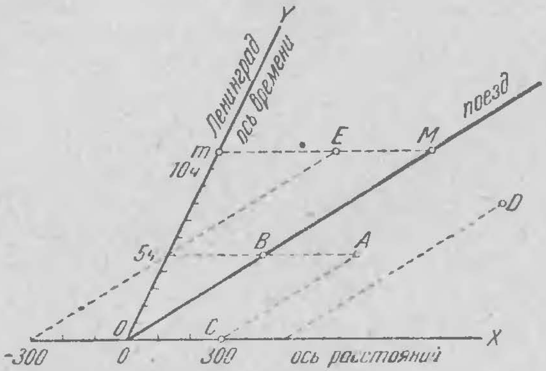


Рис. 88.

определять расстояния разных событий от поезда, нужно поступать так, как если бы г р а ф и к д в и ж е н и я п о е з д а б ы л о с ь ю в р е м е н и.

Итак, если мы хотим определять расстояния разных событий от Ленинграда, мы должны выбрать осью времени прямую OY, точки которой изображают собой Ленинград в разные моменты. Если же мы хотим определять расстояния событий от поезда, мы должны осью времени считать прямую OM, точки которой изображают поезд в разные моменты.

Пассажир, сидящий в поезде, склонен, конечно, относить все расстояния к поезду. Поэтому он будет считать осью времени прямую OM. Наблюдатель, остающийся в Ленинграде, наоборот, выберет в качестве оси времени прямую OY. Соответственно этому ленинградец будет считать, что, например, события L_1 и L_2 (которые происходят в Ленинграде) совершаются в одном и том же месте, а P_1 и P_2 (которые происходят в поезде) совершаются в разных местах (рис. 89). Иначе говоря, ленинградец считает Ленинград неподвижным, а поезд движущимся, тогда как пассажир, наоборот принимает, что поезд неподвижен (P_1 и P_2 происходят в одном месте), а Ленинград движется назад (L_1 и L_2 происходят в разных местах). Вы уже знаете, что обе точки зрения (пассажира и ленинградца) равноправны.

Осью пространства для обоих наблюдателей остается прямая OX, так как и ленинградец и пассажир согласны в том, что например, события K_1 и K_2 произошли одновременно, именно в полночь. Чтобы между пассажиром, который считает поезд неподвижным, и наблюдателем, который считает неподвижным Ленинград, было пол-

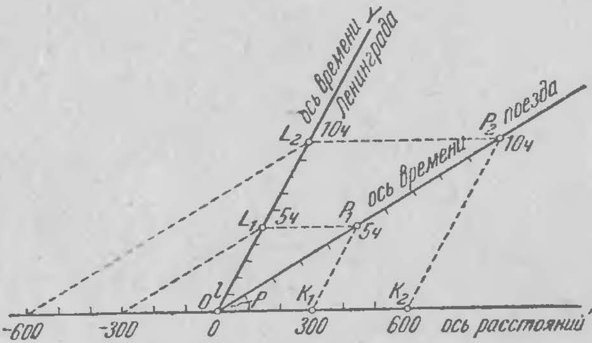


Рис. 89.

ное согласие в оценке времени (ведь наш мир таков, что никаких разногласий на этот счет не возникает, не правда ли?), необходимо еще надлежащим образом выбрать масштабы на осях времени. Именно следует считать, что отрезок OP на оси пассажира изображает такой же промежуток времени, какой изображает меньший отрезок Ol на оси ленинградца.

Словом, наш мир, согласно обычным представлениям, устроен таким образом, что графическое описание событий с точки зрения двух движущихся относительно друг друга наблюдателей (мы говорим о равномерном прямолинейном движении) должно производиться согласно изложенным правилам: разным наблюдателям соответствуют разные оси времени и разные масштабы для времени, а ось пространства остается одна и та же.

Иначе устроен воображаемый мир № 1. Чтобы изобразить здесь события с точки зрения двух наблюдателей, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, нужно поступать по иным правилам.

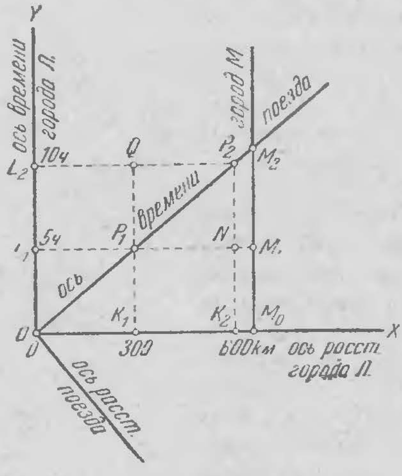


Рис. 90.

Во-первых, координатные оси здесь, как утверждает Барнэй, должны быть непременно взаимно перпендикулярны. Пока речь идет о графике движения поезда с точки зрения одного наблюдателя, скажем, находящегося на станции, это требование не вносит ничего нового: получается обычный график, такой, какой чертят в школе (рис. 90). Точки прямой OM_2 изображают поезд в различные моменты. Точки прямой OY (ось времени) — это станция отправления, точки прямой M_0M_2 — станции назначения. Точка P_1 изображает событие, происходящее на расстоянии 300 *км* от города *Л* в 5 часов утра, M_2 — прибытие поезда в город *М*.

Станем теперь на точку зрения пассажира, едущего в поезде. Он в праве считать поезд неподвижным, а полотно дороги убегающим навстречу поезду. Такой точке зрения соответствует выбор прямой OM_2 в качестве оси времени. В этом тоже еще нет ничего нового. Но ось пространства пассажира должна быть непременно перпендикулярна к его оси времени. В этом заключается первое существенное отличие мира № 1 от нашего мира. Кроме того, масштабы на разных осях времени в мире № 1 должны быть одинаковы, и точно так же должны быть одинаковы масштабы на разных осях пространства. Чтобы установить масштабы на разных осях, нужно провести вокруг общего начала координат, как около центра, окружность. Эта окружность отсекает на координатных осях равные отрезки, которые на всех осях времени изображают один и тот же промежуток времени, а на всех осях пространства — одно и то же расстояние (рис. 91).

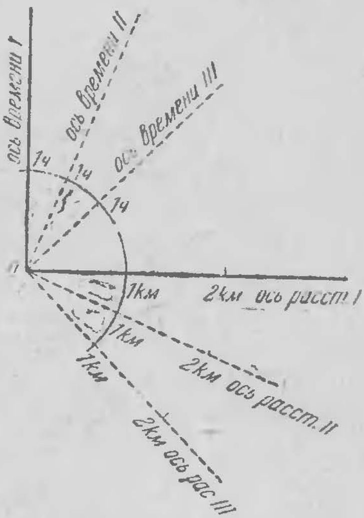


Рис. 91.

Почему в мире № 1 нужно применять именно такое правило замены координат при переходе от точки зрения одного наблюдателя к точке зрения другого наблюдателя? Потому что мир № 1 устроен так, что только при соблюдении этого правила мы получаем согласное с фактами описание того, как в этом мире воспринимают события наблюдатели, движущиеся друг относительно друга. Пусть в момент отправления поезда пассажир и наблюдатель, остающийся на станции, ставит свои часы на 12. Спустя некоторое время наблюдатель на станции видит вдали вспышку пламени и слышит грохот взрыва. Он смотрит на свои часы и отмечает, что взрыв (событие A на рис. 92) произошел, скажем, в 4 часа дня. Тот же взрыв слышит и пассажир, смотрит на часы и устанавливает, что взрыв случился в 6 часов дня. Точно так же по-разному оценивают они расстояние до того места, где произошел взрыв. Чем вызвано это разногласие? Конструкцией мира № 1. Этот мир устроен так, что подобные разногласия в нем неизбежны. Правило графического изображения событий, которое мы выше установили, находится в полном согласии с указанной особенностью этого мира.

Странное несогласие в оценке места и времени одного и того же события разными наблюдателями представляется Гарвуду совершенно нелепым, но, забегая немного вперед, скажем, что подобное несогласие существует, как установил Эйнштейн, и в нашем действительном мире. Весьма интересно поэтому познакомиться с тем, как воспринимают это, казалось бы, нелепое разногласие коренные обитатели мира № 1, вроде Барнэя. Хотя мир № 1 устроен иначе, чем наш мир, тем не менее между ними, согласно Эйнштейну, есть так много общего, что, усвоив образ мышления жителей мира № 1, мы затем без труда сумеем ориентироваться в несколько более сложном мире Эйнштейна.

Вернемся к нашему прерванному повествованию.

4. Лечение математикой

Мистер Барнэй так заинтересовал меня, что оттеснил на задний план вчерашние странные происшествия.

«Кто бы мог предположить, — думал я, — что этот спокойный человек помешался на графиках! Пожалуй, если доказать ему вздорность его идеи, он излечится. Но как переубедить несчастного?»

Я стал обдумывать следствия, вытекающие из его графика, и скоро наткнулся на ряд вопиющих нелепостей.

Первая нелепость. Событие A, с точки зрения наблюдателя, сидящего в гостинице, случилось в 4 часа дня, а с точки зрения путешественника в 6 часов дня (рис. 92): одно и то же событие происходит с точки зрения разных наблюдателей в разное время.

Вторая нелепость. Два события A и B, одновременные для наблюдателя в гостинице (оба происходят в 4 часа дня), не одновременны для путешественника: для него событие A случилось в 6 часов дня, а B в 5 часов.

Третья нелепость. Наблюдатель и путешественник по-разному оценивают один и тот же промежуток времени. Например, между событиями O и A прошло с точки зрения наблюдателя 4 часа, а с точки зрения путешественника — 6 часов.

Четвертая нелепость. Наблюдатель и путешественник по-разному оценивают одно и то же расстояние.

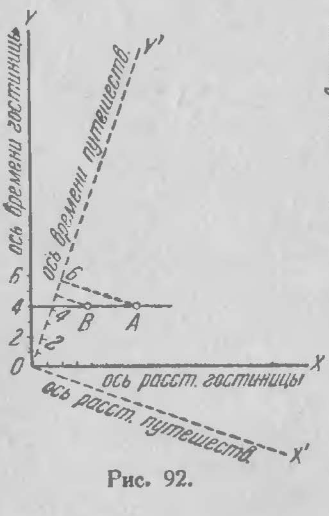


Рис. 92.

Рис. 93

Например, пусть точки прямой EE (рис. 93) изображают город в разные моменты. Тогда расстояние от гостиницы до города с точки зрения нашего наблюдателя измеряется отрезком OD, т. е. равно 150 *км*, а с точки зрения путешественника отрезком OD', т. е. равно 200 *км*.

С этой последней нелепости я и решил начать лечение моего бедного хозяина. Мистер Барнэй сидел у себя в кабинете.

— Сколько километров до города? — спросил я, подойдя к нему с невинным видом.

— Сто пятьдесят.

— Вот видите, а с точки зрения путешественника, если он будет придерживаться вашего метода, получится больше, например 200.

Я с торжествующим видом протянул свой чертеж.

— Да, — невозмутимо ответил мистер Барнэй, даже не взглянув на него, — с точки зрения путешественника 200.

— Но ведь вы сами сказали, что до города 150 *км*; что же ввело в заблуждение путешественника? Не ваш ли метод?

— О каком заблуждении вы говорите? С нашей точки зрения от моей гостиницы до города 150 *км*, а с точки зрения путешественника — 200.

— Чем же вы объясните разногласие между нами и путешественником?

— Не вижу никакого разногласия.

— Помилуйте: один говорит 150 *км*, другой — 200! А вы спрашиваете, какое разногласие...

— Да нет же! Один говорит: «с моей точки зрения 150 *км*», а другой — «с моей точки зрения 200». Какое же тут разногласие?

— Но расстояние-то одно?

— Нет, разные.

— Разные?!.. Дорога одна?

— Дорога одна, но точки зрения разные; поэтому и расстояния разные. Длина дороги с точки зрения одного наблюдателя 150 *км*, с точки зрения другого — 200.

— Одна и та же длина может быть, в зависимости от точки зрения, разной?

— Не одна и та же длина, а одна и та же дорога. С разных точек зрения она, конечно, имеет разную длину.

— Не понимаю, — сказал я, разводя руками.

Мистер Барнэй вздохнул.

— Под каким углом вы видите ту колокольню? — спросил он.

— Градусов 10.

— Тот прохожий видит ее под бо́льшим углом, градусов в 20, — продолжал мистер Барнэй, косо взглянув на меня, как будто с опаской. — Вам не кажется, что между вами имеется разногласие?

— Нет, какое же разногласие? Мы смотрим на колокольню с разных точек зрения.

— С разных точек зрения одна и та же колокольня видна под разными углами, — подхватил Барнэй. — Так и дорога: с разных точек зрения одна и та же дорога представляется разной длины.

— Какова же ее истинная длина?

— А каков истинный угол, под которым видна колокольня?

— Нелепый вопрос! Истинного угла, под каким видна колокольня не существует, это — абсурд. Есть только угол, под каким она видна из одной точки, из другой, из третьей.

— Прекрасно, — сказал Барнэй. — То же самое относится и к дороге. Истинной длины дороги не существует, это — абсурд. Существует только длина, под которой дорога представляется с одной точки зрения, с другой, с третьей и т. д.

— Что значит «длина, п о д к о т о р о й представляется дорога с данной точки зрения?»

— Мы обычно говорим короче: «длина дороги с данной точки зрения». Но это плохое выражение, потому что дорога длины не имеет, как колокольня не имеет угла. Существует только угол, под которым колокольня видна из разных точек. Точно так же существует только длина, под которой представляется дорога с разных движущихся относительно нее систем. Угол, под которым вы видите колокольню, зависит от того, как далеко вы от нее находитесь. Длина, под которой представляется дорога, зависит от того, как скоро вы относительно нее передвигаетесь.

— Значит, по-вашему, дорога не имеет длины?

— Разумеется, нет.

— Ваш стол не имеет длины?

— Не имеет. Вам и мне он виден под длиной в два метра, а тому прохожему — под большей длиной.

— Вы считаете в порядке вещей, что с точки зрения путешественника расстояние отсюда до города больше, чем с точки зрения неподвижного наблюдателя?

— Разумеется.

— Если я на автомобиле поеду мимо вашего дома, то дом представится мне длиннее, чем сейчас?

— Да.

— Чем же вызывается такой обман зрения?

— Никакого обмана зрения здесь нет.

— Вы хотите сказать, что дом действительно станет длиннее? Какая же сила его растянет?

— Ничего с домом не сделается. Изменится только длина, под какой он виден.

— Вы говорите: длина дома изменится, а с домом ничего не станется. Как же так?

— Не длина дома, а длина, под которой виден дом. Угол, под которым видна колокольня, увеличится, когда вы подойдете к ней ближе, хотя с колокольней при этом ничего не сделается. Так и с домом. С ним ничего, конечно, не случится от того, что вы проедете мимо него, но длина, под которой он вам представляется, изменится. Ведь эта длина зависит не только от дома, но и от скорости наблюдателя относительно него.

Я почувствовал, что почва под моими ногами колеблется. Здравый смысл во мне протестовал против безумной логики этого сумасшедшего, но я не находил доводов, которые можно было бы противопоставить ей. Самое сильное оружие было выбито из моих рук. Однако я не сдавался и пустил в ход другие нелепости.

— А промежутки времени существуют, или они тоже только самообман? — робко спросил я.

— Конечно, существуют, как и длина и углы. Разве угол, под которым видна колокольня, самообман? А длина, под которой представляется дорога, самообман? Все это существует в действительности, все это можно измерить.

— Взгляните. Промежуток времени между событиями *О* и *А* с точки зрения наблюдателя, сидящего в гостинице, равен четырем часам, а с точки зрения путешественника — шести. Разве это не нелепо? Один и тот же промежуток времени оценивается по-разному, и неизвестно, кто прав.

— Вы повторяете прежнюю ошибку, — возразил мистер Барнэй. — Тут не один промежуток времени, а два.

— Почему два? Вот, например, *О* изображает отъезд путешественника, а *А*, — скажем, — крушение его автомобиля. Тогда промежуток времени между *О* и *А* есть длительность путешествия от отъезда до крушения. Ведь тут о д н а длительность.

— Нет, две. Продолжительность путешествия с точки зрения вашего наблюдателя — это одна. Продолжительность путешествия с точки зрения путешественника — это другая. Так же, как с углами, под которыми видна колокольня; угол, под которым она видна отсюда, и угол, под которым она видна из другого места, — два разных угла.

— Значит, нельзя узнать, сколько продолжалось путешествие на самом деле?

— Этот вопрос не имеет смысла. Наблюдатель пережил путешествие под промежутком времени в 4 часа, а путешественник пережил его под промежутком времени в 6 часов. Это и было на самом деле.

— Стало быть, не существует длительности самой по себе? Можно говорить только о длительности, под которой пережиты два события — начало и конец процесса — из автомобиля, из поезда, из гостиницы и т. д.?

— Да.

Я больше не спорил и только задавал вопросы, потому что безумие Барнэя начало овладевать и мной. Впрочем, тогда я еще не сознавал этого.

— А может ли случиться, что два события, которые один наблюдатель воспринимает под промежутком времени, скажем, в 1 час, другой воспринимает под нулевым промежутком времени?

— Да, если наблюдатели движутся друг относительно друга. То, что одновременно для одного, не одновременно для другого.

— Странно, более чем странно! — проговорил я в раздумьи.

— Вы как будто начинаете приходить в себя, — сказал мистер Барнэй. — Повидимому, вы были жертвой обыденной речи. Мы говорим: «пять метров сукна», «урок длился 2 часа» и т. д. Это, конечно, может сбить с толку.

— А как надо говорить, по-вашему?

— Надо так: «кусок сукна, который представляется наблюдателю, неподвижному относительно него, под длиной в 5 *м*». «Урок, который представляется наблюдателю, неподвижному относительно класса, под промежутком времени в 2 часа».

— Пространно и неудобно, — заметил я.

— Да, потому в обыденной речи и выражаются короче. Но не нужно забывать, что при этом, в буквальном смысле слова, ради краткости смысл опускается. — Мистер Барнэй улыбнулся.

Я ушел к себе потрясенный.

5. „Врачу, — исцелися сам"

Я не ложился и, сидя за столом, продолжал искать новые нелепости для борьбы с безумием мистера Барнэя. Я находил их не мало, но все они исчезали, как только я вспоминал слова Барнэя: «Вещи не имеют длины; существуют только длины, под которыми вещь представляется с разных движущихся друг относительно друга систем. Явления не имеют длительности; существуют только длительности, под которыми представляется явление из разных движущихся друг относительно друга систем». Наконец, я набрел на одну нелепость, которая показалась мне очевиднее других.

Когда часы путешественника показывают 2 часа (точка 2′ на рис. 94), часы в гостинице показывают 1 час (точка 1). Это — с точки зрения человека, сидящего в гостинице. А с точки зрения путешественника получается вот что: когда его часы показывают 1 час (точка 1′), часы в гостинице показывают 2 часа (точка 2). Часы путешественника уходят сравнительно с часами в гостинице, а часы в гостинице уходят (тоже уходят!) сравнительно с часами путешественника.

Подобная же нелепость получилась и с длиной. Метровая линейка, уложенная вдоль автомобиля, с точки зрения наблюдателя в гостинице имеет в длину больше метра, а с точки зрения путешественника такая же линейка, уложенная вдоль дороги, тоже имеет в длину больше метра (рис. 95). Иван больше Петра, а Петр больше Ивана... Абсурд! Я тотчас побежал к Барнэю.

Мистер Барнэй укладывался спать. Наскоро извинившись за позднее посещение, я с торжествующим видом преподнес ему свое открытие.

Он внимательно поглядел на меня сквозь очки.

— У вас усталый вид, мистер Гарвуд, — сказал он, — вам надо отдохнуть и полечиться.

— Мистер Барнэй, оставьте в покое мое здоровье. Признайтесь, такой ерунды вы не ожидали...

— Почему вы считаете это ерундой?

— Разве не видите? Час путешественника больше, чем час в гостинице, а час в гостинице больше, чем час путешественника. A больше B, а B больше A.

— Что вы называете часом путешественника?

Рис. 94.

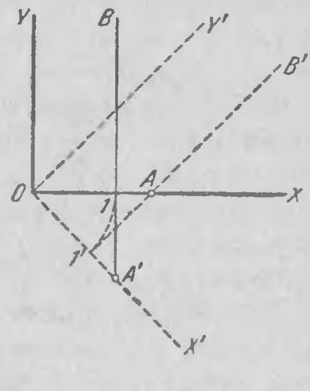


Рис. 95.

— Ну, хотя бы время полного оборота минутной стрелки на его часах.

— Что значит «время полного оборота»? С какой точки зрения оценивается это время.

— Без всякой точки зрения...

— Тогда это бессмысленный набор слов. Оборот стрелки не имеет длительности сам по себе...

— Ну, уж если вам так необходима «точка зрения», — выпалил я, — будем считать, что время оборота стрелки оценивается с точки зрения человека, не страдающего ожирением мозга...

Я тотчас пожалел о своей грубости; но мистер Барнэй не понял намека.

— Дело не в его мозге, — невозмутимо ответил он, — а в том, движется ли наблюдатель относительно часов или нет.

— Не все ли равно? Дело не в нем, а в часах.

— Дело не только в часах, но и в том, с какой скоростью наблюдатель движется относительно часов. Разные наблюдатели воспринимают оборот стрелки под разными промежутками времени, если они движутся относительно часов с разными скоростями. Под наименьшим промежутком времени переживает это явление наблюдатель, неподвижный относительно часов. Поэтому, с точки зрения каждого наблюдателя, все часы уходят, кроме его собственных.

— Как ни изворачивайтесь, никогда я не поверю, будто возможно, что A больше B, а B больше A, — с раздражением сказал я.

— Да нет же! В вашем примере не две величины, а четыре. Час путешественника с точки зрения путешественника — это A. Час наблюдателя с точки зрения путешественника — это B. Как мы уже говорили, A меньше B. Затем час наблюдателя с точки зрения наблюдателя — это C. И час путешественника с точки зрения наблюдателя — это D. Как мы знаем, $C < D$. При этом $A = C$ и $B = D$. Что же вас смущает?

Когда я вышел из комнаты мистера Барнэя, за мной щелкнула задвижка. Я понял, что мистер Барнэй сегодня больше не желает заниматься графиками.

6. Последняя ставка

Под утро новая мысль осенила меня, и вместе с нею родилась надежда. Опыт!.. Как я мог забыть о нем, — единственном надежном учителе... Сколько раз выводил он человеческую мысль из тупиков, куда она забиралась, бродя во тьме. Он не даст обмануть себя хитрыми софизмами. Нет, мистер Барнэй, мы еще поборемся!

Как только во дворе послышался голос мистера Барнэя, я бегом устремился к нему.

— Я не сдаюсь, мистер Барнэй! — закричал я. — Пусть опыт решит наш спор.

— Какой опыт?

— Самый простой: поедем! Посмотрим, сделаются ли дома длиннее с нашей точки зрения, изменятся ли промежутки времени, под которыми мы видим явления...

Мистер Барнэй попятился.

— А ваше путешествие в город? — спросил он. — Вы забыли?

Мое путешествие в город! Оно выскочило у меня из головы. Предо мною вдруг встала растянутая дорога, странный ход часов, ужасные фигуры прохожих, которых я встречал, гибкие колеса, скисшее молоко... Прежде чем я успел понять это, я почувствовал, что моя ставка бита.

Да, я видел дорогу и прохожих под другой длиной чем сейчас, я пережил путешествие под промежутком времени в шесть часов вместо двух. Отсюда мой удивительный аппетит, отсюда чрезмерный расход бензина, поэтому постарело мое молоко, поэтому так уродливы были прохожие. Факты — тоже против меня...

7. Без мистера Гарвуда

Мы оставляем мистера Гарвуда в самый критический момент его жизни. Оставляем навсегда. Нехорошо покидать друга в опасности. Еще хуже, если автор оставляет своего героя в беде. Но я пишу не рассказ приключений, а популярную статью о теории относительности. Мистер Гарвуд и мистер Барнэй придуманы для того, чтобы ознакомить вас с основными идеями Эйнштейна: вещи не имеют длины, явления не имеют длительности; одну и ту же вещь мы воспринимаем то под одной длиной, то под другой, в зависимости от того, с какой скоростью движемся мы относительно нее. Это не иллюзия, не кажущееся изменение; длина действительно изменяется, хотя вещь остается неизменной. То же относится к длительности, под которой мы переживаем явления.

В мире № 1, куда на свою беду попал мистер Гарвуд, эти свойства выступают с полной отчетливостью. Коренные обитатели этого мира — например мистер Барнэй, — прекрасно ориентируются в нем. Их представления сложились под влиянием их опыта и, разумеется, находятся в добром согласии с фактами. Иной мир был бы для них совершенно непонятен. Им показалось бы нелепым, что два события, одновременные с точки зрения одного путешественника, почему-то одновременны и для всех; что линейка каким-то образом видна всем путешественникам, как бы они ни двигались относительно нее, всегда под одной и той же длиной.

Некоторые философы утверждают, будто по Эйнштейну длина и длительность зависят от сознания наблюдателя. Это не верно. Разные наблюдатели оценивают длину одного и того же предмета и длительность одного и того же явления по-разному, но их оценка зависит не от состояния их сознания, а от относительной скорости их движения. Сознание наблюдателей здесь не при чем. Угол, под которым видна колокольня, зависит не от наблюдателя, который этот угол измеряет, а от его положения относительно колокольни (и, разумеется, от высоты самой колокольни). Точно так же длина линейки зависит не только от линейки, — как принято было думать до Эйнштейна, — и не от наблюдателя, который ее измеряет, — как утверждают некоторые философы, извращая Эйнштейна, — а от скорости движения наблюдателя относительно линейки.

В конечном итоге Эйнштейн утверждает, что в действительности происходят изменения, подобные тем, которые смутили Гарвуда во время его воображаемого путешествия. Мы не замечаем их в обыденной жизни, потому что они крайне малы. Но вообразите на минуту, что все обстоит, как описано в мире № 1. Можно ли приписать особенности этого мира состоянию сознания наблюдателей? Конечно, нет. Для всякого путешественника, независимо от его сознания, расстояние от гостиницы Барнэя до города будет ровно 200 *км*, если он проедет это расстояние с той же скоростью, с какой ехал Гарвуд; оно будет иным, если путешественник поедет с другой скоростью, — но оно совершенно не зависит от сознания путешественника. То же относится и к длительности какого-либо явления.

«Перед нами встает вопрос, — пишет один автор, — а есть ли какая-либо объективная продолжительность времени или длина, существующая независимо от измеряющего ее наблюдателя? Раз все зависит от точки зрения, то здесь мы имеем серьезный разрыв с основами диалектического материализма».

Так ли это? Нет, не так. Если бы длина и длительность зависели от наблюдателя, эти понятия потеряли бы всякое объективное значение и должны были бы быть изгнаны из физики. По Эйнштейну длина и длительность ни в какой мере не зависят от наблюдателя. Правда, при изложении теории относительности часто говорят о длине и длительности «с точки зрения того или иного наблюдателя». Но наблюдатель привлекается здесь только для того, чтобы обнаружить некоторые соотношения между величинами в движущихся друг относительно друга системах, сами же эти соотношения ни в какой степени от него не зависят. По старым представлениям эти соотношения зависят только от самих вещей; по Эйнштейну они зависят еще и от относительной скорости этих вещей, но не от наблюдателя. Нельзя, например, говорить, что одна линейка вдвое длиннее другой, так как с изменением их относительной скорости изменится отношение их длин. Ни в коем случае нельзя также говорить, что с точки зрения такого-то наблюдателя одна линейка во столько-то раз длиннее другой, так как наблюдатель здесь совсем уж не при чем. Надо говорить так: «При такой-то относительной скорости двух линеек одна из них во столько-то раз длиннее другой». Этим констатируется некоторый объективный факт, не зависящий ни от какой «точки зрения». Наблюдатель здесь нужен, как всегда, только для того, чтобы этот факт обнаружить.

Имеет ли линейка длину, не зависящую от измеряющего ее наблюдателя? Вопрос неправильно поставлен. Линейка вообще не имеет длины. Но существует определенное отношение длин двух линеек, которое зависит от относительной скорости их (и от самих линеек) и не зависит ни от какого наблюдателя. Утверждать, что в теории относительности «все зависит от точки зрения», значит не понимать этой теории. Здесь все зависит от относительной скорости, а не от «точки зрения». Таким образом, никакого разрыва с диалектическим материализмом в теории Эйнштейна нет, но есть глубокий разрыв со старыми представлениями.

Что дало повод Эйнштейну утверждать, что вещи сами по себе не имеют длины, а явления — длительности, — об этом речь впереди.

Пока же читатель должен конкретно представить себе, что именно утверждает Эйнштейн. Основные идеи его раскрыты выше, при описании мира № 1. Впрочем, мир № 1 кое в чем существенно отличается от нашего мира, каким его рисует Эйнштейн.

Освоиться с особенностями мира № 1 и научиться мыслить понятиями его обитателей не трудно. Но есть здесь одно обстоятельство, с которым совершенно невозможно примириться. Чтобы изобразить наглядно это затруднение, пошлем туда нашего корреспондента. На этот раз его обязанности я беру на себя. Читайте мое письмо.

8. Крушение мира № 1

Мы ехали во всю прыть наших неказистых кляч. Прямая и ровная дорога шла густым лесом. Местность считалась «нечистой»: говорили, что здесь пошаливают. Кучер то-и-дело боязливо оглядывался и не переставал погонять лошадей, которые, впрочем, при каждом ударе только вскидывали головами, но не прибавляли шага. Со мной ехал мистер Барнэй. Он сидел на облучке, повернувшись ко мне, спиной к лошадям и что-то рассказывал. Вдруг он вскрикнул, схватился за грудь и опрокинулся назад. (Это событие на графике изображено точкой *A*.)

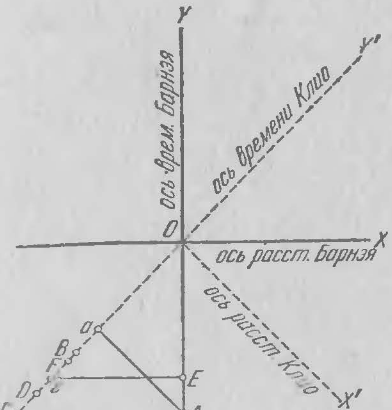


Рис. 96.

— Что с ним? — воскликнул я.

— Убит. Пуля попала в сердце, — ответил кучер.

— Кто же стрелял?

— Вероятно, это негодяй Клио *собирается выстрелить*. (Выстрел Клио изображен точкой *B*.)

— Вы говорите «собирается»; но ведь мистер Барнэй уже убит!

— Да, убит. Я и говорю, что убийцей будет Клио. Поглядите, вон он скачет за нами (точка *C*). Держу пари, что он нас догонит через 10 минут (это будущее событие изображено точкой *O*).

Град ударов посыпался на коренника; но несчастная кляча предпочитала работать головой, чем ногами, так что наша скорость не изменилась. Я оглянулся. Вдали по дороге, нагоняя нас, быстро несся всадник. На всем скаку он поднял ружье и начал прицеливаться (точка *D*). Я невольно пригнулся и намеревался соскользнуть на дно повозки.

— Не бойтесь, он целится в Барнэя, — сказал кучер, ткнув кнутом в сторону трупа, лежащего у моих ног.

— Зачем же в него стрелять, раз он уже мертв? — спросил я.

— Чудак вы! Ведь Клио нас догоняет, значит — мистер Барнэй для него еще жив. (Смерть Барнея с точки зрения Клио одновременна с событием *a*, которому предшествует событие *D*.)

— В таком случае надо его укрыть, — воскликнул я, хватаясь за труп и стараясь стащить его вниз.

— Чего же его прятать, когда он мертв? — возразил кучер.

Опасность вышибла из моей головы все представления и понятия, относящиеся к новому миру, которые, как мне казалось, я твердо усвоил. Мне стало конфузно за глупости, которые я говорил. Вдруг блестящая мысль осенила меня.

— Погодите же, — закричал я. — Я сейчас подстрелю этого негодяя.

Сказано — сделано. Бац! (точка E на графике). Клио свалился мертвый (точка F).

— Он не успел выстрелить, — радостно воскликнул я. — Выстрел, который должен был убить мистера Барнэя, никогда не будет произведен.

— Разумеется, — согласился кучер. — После смерти не выстрелишь.

— Значит, мистер Барнэй спасен!

— Где там спасен, когда у него в сердце пуля сидит. Нет, его не воскресишь. Он уже похолодел.

— Какая пуля? Ведь Клио не выстрелил и никогда не выстрелит Не может же в вашем сумасшедшем мире пуля, которая никогда не вылетит из ружья, находиться в сердце мистера Барнэя.

— Ну, уж . . . не могу вам объяснить . . . — ответил кучер. В голосе его была растерянность. — А только вы напрасно насчет нашего мира выражаться изволите. Сами нас выдумали, запутались, да нас же и попрекаете. Нехорошо, сударь . . .

Действительно, нехорошо. Мир, в котором следствия могут предшествовать причинам, решительно ни на что не годится. Приходится признать, что мир № 1 пал жертвой закона причинности.

II. МИР НОМЕР ВТОРОЙ

9. Научная организация фантазии (НОФ)

На развалинах мира № 1 необходимо поставить вопрос: возможен ли вообще такой мир, в котором вещи сами по себе не имеют длины, явления не имеют длительности и нет абсолютной последовательности событий.

Не обречен ли всякий мир этого рода на гибель от столкновения с законом причинности?

Мы утверждаем, что подобный мир возможен. Чтобы доказать это, нужно его построить, т. е. придумать. Но как придумать мир? Попробуйте, читатель, выдумать что-либо новое: сказку, сюжет для рассказа приключений, узор для обоев, рисунок для ситца, музыкальную мелодию. Если вы не исключительно одаренный творческим воображением человек, то убедитесь, что фантазия ваша тяжело и неуклюже топчется на месте, цепляясь за обрывки старого — слышанного, виденного, читанного, — и громоздит из них нечто скорее нелепое, чем фантастическое. Наша «крылатая фантазия», увы, нуждается в костылях.

Как помочь беде? В эпоху Научной организации труда (НОТ) и Научной организации быта (НОБ) естественно заняться Научной организацией фантазии (НОФ).

Математики придумали четвертое измерение, неевклидовы геометрии, мнимые числа и т. п. диковинки. Все это, быть может, очень скучные вещи, но по смелости и оригинальности они оставляют далеко позади самые счастливые идеи авторов фантастических романов. Неужели же сухие профессора-математики наделены более богатым воображением, чем профессиональные мастера выдумки — писатели? Разумеется, нет. Но писатели кустарничают, а профессора фантазируют научно.

Мы должны последовать примеру математиков и обратиться к Научной — скажем точнее — к Математической организации фантазии. Некоторый опыт в этом деле у нас уже есть: мир № 1 был придуман математически. Он создан тем, что мы (устами мистера Барнэя) задали правило графического изображения событий этого мира с точки зрения разных наблюдателей, движущихся друг относительно друга. Вся наша выдумка заключалась в том, что мы приняли, будто ось пространства наблюдателя всегда должна быть перпендикулярна к его оси времени. Почему непременно перпендикулярна? Вопрос незаконный. Фантазия имеет свои права, из них основное — право выдумывать все, что угодно, лишь бы выдумка не привела к логическому абсурду или к столкновению с законом причинности. Правило, положенное в основу графического построения мира № 1, привело к такому столкновению. Значит, оно было неудачно. Приходится его отбросить и подыскать другое правило, опять-таки совершенно произвольное, но способное ужиться с законом причинности.

10. Построение мира № 2

Каждый наблюдатель оценивает место и время любого события, происшедшего на некоторой дороге, по своим осям пространства и времени OX и OY. Эти оси могут быть и не перпендикулярны одна другой (рис. 97).

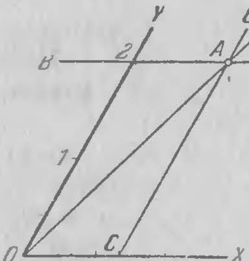


Рис. 97.

Чтобы изобразить графически событие A, которое произошло через два часа после начального события O, на расстоянии 200 *км* от него, наблюдатель поступает так: отсчитывает по оси времени вверх от точки O два деления (каждое деление соответствует, в принятом нами масштабе, одному часу) и проводит прямую параллельную оси пространства: это геометрическое место точек, изображающих события, происшедшие с точки зрения данного наблюдателя через 2 часа после начального момента. Затем отсчитывает по пространственной оси, вправо от точки O, 2 деления (каждое деление соответствует в принятом нами масштабе 100 *км*) и проводит прямую, параллельную оси времени: это геометрическое место точек, изображающих события, которые произошли с точки зрения наблюдателя на расстоянии 200 *км* от начального события. На пересечении прямых BB' с CC' лежит точка-событие, интересующее нас. Легко понять, что прямая OA явится графиком движения точки, которая в начальный момент O находилась рядом с нашим наблюдателем и движется со скоростью 100 *км/час.*

Прямая OY есть график движения самого наблюдателя. Станем теперь на точку зрения другого наблюдателя, который движется вместе с точкой A. Прямая OA — график его движения, является его осью времени. Какую прямую принять за ось его пространства? Мы отказались от требования, что ось пространства должна быть перпендикулярна оси времени, на чем настаивал Барнэй. Но мы не последуем и за Гарвудом, который предлагал принять, что ось пространства для всех наблюдателей одна и та же. Введем для ее выбора новое условие (черт. 98). Проведем биссектрису угла XOY (прямая OZ). Оси пространства и времени первого наблюдателя симметричны относительно OZ. Установим, как закон нового мира, такое общее правило: о с ь п р о с т р а н с т в а в с е г д а д о л ж н а б ы т ь с и м м е т р и ч н а о с и в р е м е н и о т н о с и т е л ь н о п р я м о й OZ. Таким образом для второго наблюдателя осью пространства будет прямая OX'.

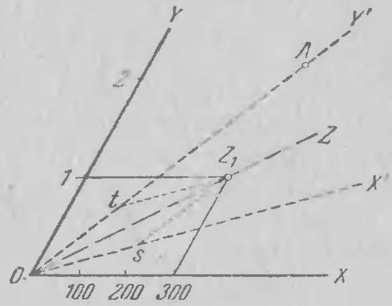


Рис. 98.

Что изображает собой прямая OZ? Она является графиком какого-то движения. С точки зрения первого наблюдателя скорость этого движения равна 300 *км/час.* С точки зрения второго наблюдателя точка Z проходит за промежуток времени, изображенный отрезком Ot, расстояние, изображенное отрезком Os, равным Ot[1]. Вопрос о масштабе на осях времени и пространстве второго наблюдателя оставляем пока открытым, но установим как закон нового мира, что соотношение между масштабными единицами для осей времени и пространства должно быть одинаково, т. е. отрезок, изображающий 1 час на оси времени, должен быть равен отрезку,

---

[1] В параллелограмме OtZ_1s диагональ OZ_1 делит угол O пополам: стало быть OtZ_1s есть ромб и $Ot = Os$.

изображающему 300 *км* на оси пространства. В таком случае относительно второго наблюдателя прямая OZ тоже является графиком движения, происходящего со скоростью 300 *км/час*. Это движение играет совсем особую роль в нашем мире: все наблюдатели, как бы они ни двигались, оценивают его скорость совершенно одинаково: 300 *км* в час.

Проведем еще биссектрису угла, смежного с углом XOY (OZ' на рис. 99). Что изображает эта прямая? С точки зрения нашего наблюдателя за промежуток времени, измеренный отрезком Ot, точка Z'_1 прошла расстояние, измеренное отрезком Os', который равен отрезку Os, измеряющему расстояние, пройденное точкой Z_1 за тот же промежуток времени, но имеет противоположное направление. Значит, с точки зрения нашего наблюдателя, Z'_1 движется с такой же скоростью, как Z_1, но в обратную сторону: Z_1, скажем, вперед, Z'_1 — назад. Таким образом, все наблюда-

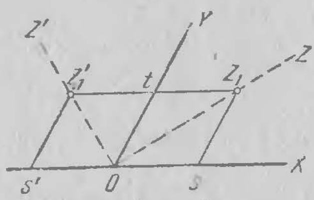


Рис. 99.

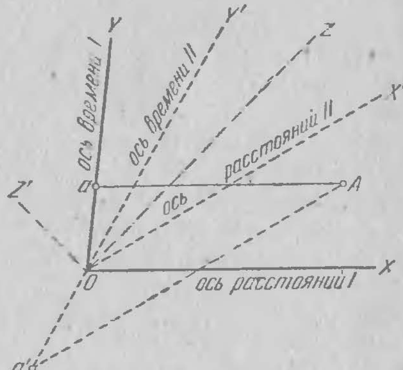


Рис. 100.

тели, независимо от того, как они движутся друг относительно друга, определяют скорость точки Z_1 в минус 300 *км/час*.

Относительно этой скорости — 300 *км/час* — мы примем еще, что она является п р е д е л ь н о й в нашем мире: ничто не может двигаться здесь быстрее. Это значит, что графики всех движений должны лежать внутри угла ZOZ'. Здесь, стало быть, должны находиться прямые, изображающие оси времени разных наблюдателей. Все оси пространства будут лежать вне этого угла.

Основные законы мира № 2 установлены. Мы можем сейчас перейти к выводам, но прежде всего необходимо убедиться в том, что нашему миру не грозит опасность со стороны закона причинности.

Событие A (черт. 100) с точки зрения одного наблюдателя произошло в момент a — позже, чем O. С точки зрения другого наблюдателя оно произошло в момент a' — раньше, чем O. Таким образом последовательность событий O и A зависит от скорости наблюдателя. Если бы событие O могло быть причиной события A, то оказалось бы, что с точки зрения второго наблюдателя следствие предшествует причине: мир № 2 разделил бы печальную участь мира № 1. Если бы, например, событие O представляло собой выстрел, а A — убийство, произведенное им, то с точки зрения второго наблюдателя убийство произошло бы до его совершения. Однако в этом случае прямая OA была бы графиком движения пули; стало быть, скорость пули была бы выше п р е д е л ь н о й, что по основному закону, установленному для мира № 2, невозможно.

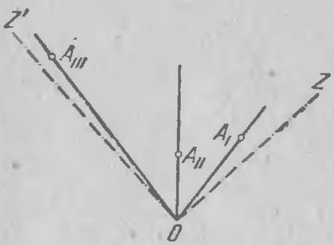


Рис. 101.

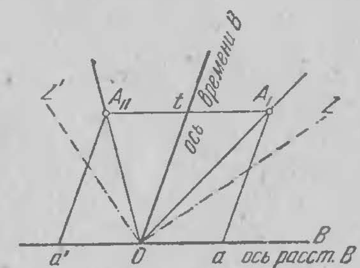


Рис. 102.

Закон о предельной скорости спасает нас от столкновений с законом причинности.

Итак, мир № 2 вполне жизнеспособен, т. е. свободен от внутренних противоречий. Некогда на вопрос, почему всемогущий бог сотворил мир в 6 дней, один американец ответил: «Вследствие технической отсталости строительного искусства такая скорость считалась в те времена рекордной». Сейчас этот библейский рекорд побит. Правда, мы не создали ни хлябей небесных, ни тверди земной, ни звезд, ни планет, — зато построили пространство и время, — чего, по библии, не сделал сам бог.

Чтобы закончить построение нового мира, остается установить правило для определения масштабов на новых осях времени и пространства. Постараемся выполнить это наиболее разумным образом. Представьте себе, что несколько путешественников: I, II, III и т. д. встретились на нашей дороге и в этот момент все поставили свои часы на ноль. Это событие на рис. 101 отмечено точкой O. Затем наши путешественники расходятся. Стрелки их часов движутся, и вот часы путешественника A показывают 1 час. Это событие (место и время его) отмечено на нашем графике точкой A_I. Таким же образом точка A_{II} изображает собой аналогичное событие с часами II, точка A_{III} — с часами III и т. д. Нет никаких оснований полагать, что все эти события одновременны с точки зрения одного из путешественников, потому что, если бы это и было так, — все равно они не были бы одновременны для других путешественников: ведь то, что одновременно для одного, не одновременно для другого. Как же установить положение точек A_I, A_{II}, A_{III} и т. д.? Очевидно, одну из них, скажем, A_I можно выбрать произвольно; тем самым мы выбираем масштаб чертежа. Сделав это, постараемся определить положение точки A_{II}. Станем для этого на точку зрения

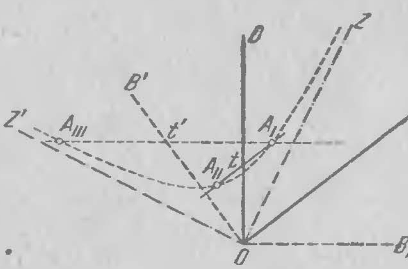


Рис. 103.

такого наблюдателя B, относительно которого путешественники I и II движутся с равными скоростями, но в прямо противоположные стороны. Наблюдатель B полагает, что часы I и II должны одновременно (с его точки зрения, конечно) показывать одно и то же время, иначе он вынужден был бы признать, что ход часов зависит не только от скорости, с которой они движутся относительно него, но еще и от того, в какую с т о р о н у о н и д в и ж у т с я. Мы вынуждены признать предположение B вполне разумным. В таком случае точки A_I и A_{II} должны лежать на прямой, параллельной пространственной оси наблюдателя B (рис. 102).

Совершенно таким же образом можно построить точки A_{III}, A_{IV} и т. д. Если выполнить построение, окажется, что все эти точки лежат на кривой, изображенной на рис. 103. Эта кривая представляет собой ветвь так называемой равнобочной гиперболы. С помощью нашей гиперболы мы можем установить масштабы на осях времени подобно тому, как ранее для этой цели нам служила окружность. Совершенно так же, с помощью другой гиперболы, можно установить масштабы на осях расстояний.

Ясно, что в мире № 2, как и в погибшем мире № 1, длительность является понятием относительным. Так, для путешественника II промежуток времени между событиями O и A равен (приблизительно) 70 минутам, а для путешественника I — одному часу (рис. 104). Наоборот, один час путешественника II с точки зрения I равен 70 минутам. Каждый из них считает, что часы другого отстают.

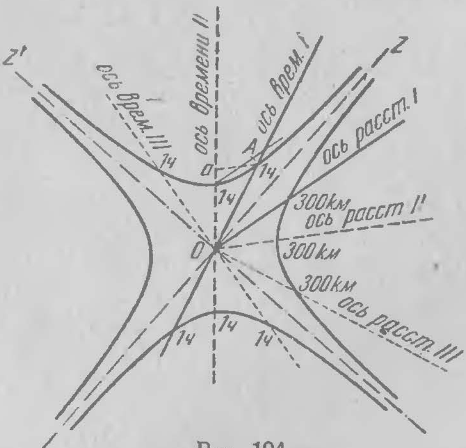


Рис. 104.

Как видите, здесь имеет место явление, обратное тому, которое происходило в мире № 1, где каждый путешественник полагал, что часы всех других уходят. Точно так же относительными являются понятия одновременности и длины.

11. Путешествие нового Гарвуда

Мы можем теперь переселить в новый мир нашего героя — Гарвуда.

Было бы, однако, слишком скучно заставить его проделать все сначала и слишком жестоко подвергать его пошатнувшийся разум дополнительным испытаниям. Ограничимся кратким описанием путешествия нового Гарвуда из гостиницы нового Барнэя в новый Град.

На рис. 105 точка O изображает отъезд Гарвуда № 2 из гостиницы в город, точка A — прибытие мистера Гарвуда № 2 в город, точка B — отправление его в обратный путь и точка C — возвращение в гостиницу.

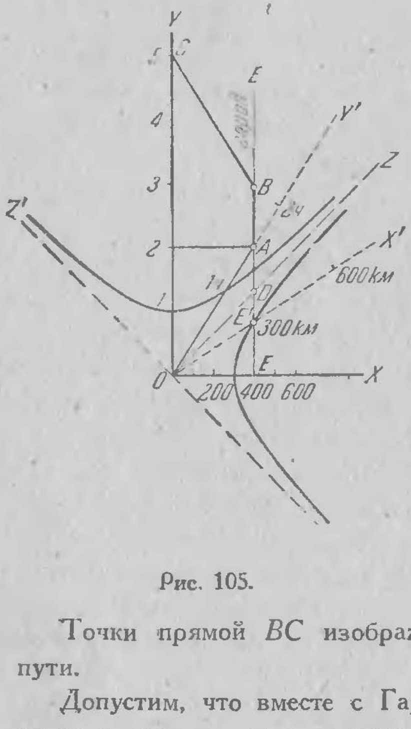


Рис. 105.

Точки O и C изображают нашу гостиницу в разные моменты; поэтому прямая OC есть геометрическое место точек, изображающих гостиницу. Точно так же AB есть геометрическое место точек, изображающих город. Так как город и гостиница неподвижны друг относительно друга, прямые AB и OC параллельны. Точки прямой OA изображают Гарвуда № 2 по дороге в город.

Точки прямой BC изображают его же на обратном пути.

Допустим, что вместе с Гарвудом № 2 из гостиницы отправляется в город сигнал, идущий с предельной скоростью (скажем, радиотелеграмма об отъезде нашего путешественника).

Отправление сигнала изображает точка O. Прибытие его в город пусть будет представлено точкой D. Прямая OZ — график предельной скорости. Перпендикулярная к ней прямая OZ' изображает предельную скорость в противоположном направлении.

Проведем, наконец, масштабные гиперболы для времени и пространства и приступим к словесному описанию изображенных событий.

Станем прежде всего на точку зрения наблюдателя, неподвижного относительно гостиницы.

Чтобы взглянуть его глазами на происходящее, нужно привести события к его осям координат.

Прямая OC (рис. 105), точки которой изображают наблюдателя в разные моменты, является его осью времени. Перпендикулярная ей прямая OX — его ось пространства. С его точки зрения, расстояние до города изображено отрезком OE и равно 400 *км*. Путешественник прибыл в город через 2 часа после отъезда[1].

Иначе происходило дело с точки зрения самого путешественника. Его ось времени прямая OA; стало быть, ось пространства OX'. Расстояние от гостиницы до города изображается отрезком OE' и равно 300 *км*. В город он прибыл через полтора часа после отъезда из гостиницы. Таким образом длина, под которой движущийся наблюдатель воспринимает дорогу между гостиницей и городом, меньше, чем длина, под которой ту же дорогу воспринимает наблюдатель, неподвижный относительно нее. Точно так же промежуток времени, под которым путешественник воспринимает свое путешествие, меньше, чем промежуток времени, под которым то же путешествие воспринимает наблюдатель, движущийся относительно первого. Значит, в мире № 2 предметы не имеют длины, и явления не имеют длительности: длина, под которой наблюдатель, движущийся относительно стержня, видит стержень, м е н ь ш е (в мире № 1 она была больше), чем длина, под которой тот же стержень представляется

---

[1] Ради отчетливости чертежа мы приняли скорость нового Гарвуда равной 200 *км/час* и изменили также другие числовые данные.

наблюдателю, неподвижному относительно него. Аналогичным образом обстоит дело и с промежутками времени, под которыми разные наблюдатели воспринимают одно и то же явление: наблюдателю, неподвижному относительно места, в котором явление совершается, оно представляется под наибольшим промежутком времени (в мире № 1 наоборот — под наименьшим).

Встречные прохожие представляются мистеру Гарвуду № 2 не вытянутыми в направлении движения, а сплюснутыми (см. заставку в конце главы).

Молоко, которое взял с собой новый Гарвуд, оказалось по возвращении более свежим, чем молоко того же удоя, оставшееся в гостинице. Сам мистер Гарвуд, проведя в пути 3 часа и в городе 1 час, вернулся в гостиницу, которая постарела к его возвращению на 5 часов. Таким образом мистер Гарвуд прожил под промежутком времени в 4 часа то, что обитатели гостиницы прожили под промежутком в 5 часов. Если бы он путешествовал дольше и быстрее, экономия во времени оказалась бы более значительной.

Любой обитатель мира № 2, которому захотелось бы узнать, что будет через 100 лет, может удовлетворить свое любопытство, «прыгнув в будущее». Для этого он должен отправиться в путь со скоростью более или менее близкой к предельной, и затем вернуться назад. Чем ближе его скорость к предельной, тем скорее достигнет он цели. Если, например, он поедет со скоростью 298,5 *км* в час, то, проездив (туда и обратно) 10 лет, найдет по возвращении жизнь ушедшей на 100 лет вперед. Его встретят новые люди, которые только по книгам знают о том, что давным-давно, 100 лет тому назад, отправился в дорогу «путешественник в будущее». Он увидит новые здания, новые города, новые обычаи, новые достижения науки и техники. Любопытство его будет удовлетворено в полной мере. Но если этот «путешественник во времени» захочет вернуться в прошлое к своим былым друзьям и сверстникам, то — увы — это окажется невозможным: он сможет только посетить их забытые могилы. «Машина времени» в мире № 2 движется только вперед.

12. Слово предоставляется фактам

Как ни удивителен мир № 2, он чрезвычайно похож на действительный мир, в котором мы живем; только предельная скорость на самом деле равна не 300 *км/час*, а 300 000 *км/сек*. Вот и все различие. Те странные явления, которые происходят с путешественниками в мире № 2, происходят и с нами, когда мы едем в трамвае, в поезде, на автомобиле. Но масштаб этих изменений иной, чем в мире № 2, ибо скорости, с которыми мы передвигаемся, составляют ничтожно малую долю предельной скорости. Часы в движущемся поезде действительно отстают сравнительно с часами на станции, но на перегоне от Ленинграда до Москвы это отставание не превысит 0,000 000 000 2 долей секунды: никакими, самыми точными измерениями не может быть оно обнаружено. Для пассажира, едущего из Ленинграда в Москву, размеры всех предметов, расположенных неподвижно относительно железнодорожного полотна или находящихся во встречном поезде, являются укороченными в направлении движения. но если поезд мчится (лучше сказать — ползет) со скоростью 100 *км/час*, то длина всего пути от Ленинграда до Москвы представляется пассажиру укороченной на 3-миллионные доли миллиметра. Обнаружить подобное изменение длины невозможно.

Какое же право имеем мы утверждать что такие абсолютно неощутительные изменения длины и длительности происходят в действительности?

Это право дает нам один замечательный опыт, который около 50 лет тому назад поверг в великое смущение всех физиков.

Когда встречаются два поезда, из которых один идет со скоростью v_1, а другой со скоростью v_2, то скорость одного поезда относительно другого равна v_1+v_2. Если же один поезд обгоняет другой, то относительная скорость их равна $v_1 - v_2$. На том же основании можно было бы ожидать, что скорость света относительно наблюдателя, который движется навстречу световому лучу, должна быть больше, а относительно наблюдателя, удаляющегося от источника света, меньше, чем относительно неподвижного наблюдателя. Именно, если скорость света относительно неподвижного наблюдателя обозначить через c, а скорость наблюдателя через v, то в первом случае (встречное движение) наблюдатель найдет, что свет движется относительно него со скоростью $c + v$, а во втором, что свет обгоняет его со скоростью $c - v$.

Этого следовало ожидать согласно обычным представлениям.

Но в 1881 г. американский исследователь Майкельсон произвел свой знаменитый опыт, на основании которого пришлось сделать вывод, что скорость света относительно наблюдателя **не зависит от того, движется ли наблюдатель навстречу лучу или удаляется в противоположную сторону.**

Объяснить этот неожиданный результат, оставаясь при старом представлении о строении нашего мира, невозможно; но результат этот совершенно понятен, если наш мир устроен, как мир № 2. Мы уже говорили, что в мире № 2 существует **предельная скорость**, которую все наблюдатели, как бы ни двигались они друг относительно друга, оценивают совершенно одинаково. Стоит только принять, что наш мир есть мир № 2 и что свет распространяется с *предельной скоростью*,— и загадка, которую поставил перед нами Майкельсон, разрешится сама собою.

Именно такое объяснение неожиданного результата опыта Майкельсона и предложил Альберт Эйнштейн.

Так появилась (в 1904 г.) «специальная теория относительности». Впоследствии (в 1916 г.) Эйнштейн, развивая свою теорию, пришел к выводу, что конструкция мира зависит от наличия тяготеющих масс, так что только в частях пространства, весьма удаленных от крупных небесных тел, строение мира совпадает с конструкцией мира № 2; вблизи же небесных тел оно отличается от конструкции этого мира тем сильнее, чем выше в данном месте напряжение тяготения. Вблизи земной поверхности отступление действительных свойств пространства и времени от свойств пространства и времени мира № 2 чрезвычайно незначительно, так как напряжение тяжести на земле сравнительно весьма мало.

Мы не можем здесь входить в изложение этой «общей теории относительности» и будем вполне удовлетворены, если статья наша поможет читателю усвоить основную идею Эйнштейна: вещи сами по себе *не имеют длины*, явления не имеют *длительности*; разные наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, оценивают по-разному длину одного и того же предмета и длительность одного и того же явления.

Редактор — *Р. Бончковский.* Технический редактор — *О. Залышкина.* Обложка художника *И. Тененбаума.*
Сдано в набор 9/XI 1936 г. Подписано в печать 10/IV 1937 г. Индекс — НПЮ-10-3
Издат. № 39. Уполн. Главлита № Б-15107
Печатн. лист. 15,25 Бум. лист. 7⁵/₈
Типограф. знаков в 1 бумажн. листе 153 600
Тираж 50 000 экз. Отпечатано во 2-й типографии ОНТИ им. Евг. Соколовой.
Ленинград, пр. Кр. командиров, 29.
Заказ № 4006.

Читатель!

Сообщи свое мнение о прочитанной книжке Я. И. Перельмана „Занимательная механика“

ОТКРЫТОЕ ПИСЬМО

МОСКВА

Улица Метростроя, д. № 1

место
для
марки

Главная редакция Научно-популярной
и юношеской литературы