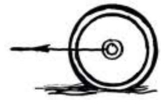
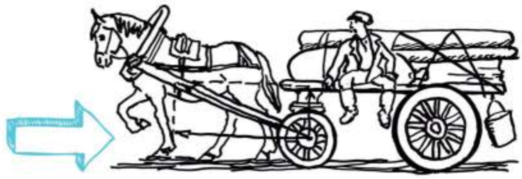
Простая наука для детей

Яков Перельман

Занимательная физика и механика



Почему переднее колесо выгодно делать маленьким?



Сколько сил действует на автомобиль?

Кто лучше прыгает?

Что такое инерция?

Как придать ускорение?

Простая наука для детей

Яков Перельман

Занимательная физика и механика

Аванта

2019

УДК 51
ББК 22.1я
П27

Перельман, Яков Исидорович.
П27 Занимательная физика и механика / Я. Перельман; Худ. Ю. Станишевский. — Москва: Издательство АСТ, 2019. — 237, [3] с.: ил. — (Простая наука для детей).

ISBN 978-5-17-098897-6.

Сколько сил действует на движущийся предмет? Ответить не сложно, если ты уже начал изучать физику и механику — один из ее разделов, посвященных изучению движения тел и их взаимодействия. Из этой книги ты узнаешь, что такое противодействие, как вычислить тягу, какой материал самый крепкий, что такое инерция, как измерить скорость дождя, почему деревья не растут до неба... и многое другое! Увлекательные задачи Якова Исидоровича Перельмана сделают науку простой и понятной.

Для среднего школьного возраста.

УДК 51
ББК 22.1я92

Глава первая
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

• Задача о двух яйцах

Держа в руках яйцо, вы ударяете по нему другим (рис. 1). Оба яйца одинаково прочны и сталкиваются одинаковыми частями. Которое из них должно разбиться: ударяемое или ударяющее?

Рис. 1. Которое яйцо сломается?

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 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 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 вселенным.

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 по крайней мере *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. Этот «принцип относительности классической механики» не следует смешивать с «принципом относительности Эйнштейна», выдвинутым только в начале этого столетия и представляющим дальнейшее развитие первого принципа.

• Путешествие на деревянном коне

Из 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 другого. 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 идти, 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 по механическому эффекту состояние покоя от состояния 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 направления вращения земного шара. Тогда окрестность будет бежать навстречу поезду, и топливо будет расходоваться лишь на то, чтобы мешать паровозу быть увлекаемым назад, — вернее, чтобы помогать ему хоть немного отставать от движения окрестности на восток. Пожелай машинист удержать поезд совсем от участия во вращении Земли, он должен был бы топить и смазывать паровоз так, как нужно для скорости примерно две тысячи километров в час.

Впрочем, он бы и не нашел паровоза, подходящего для этой цели: только реактивные самолеты смогут развивать такую скорость.

Пока движение поезда остается вполне равномерным, собственно, нет 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 (рис. 2). Поставлены ли оба противника в строго одинаковые условия? Не вправе ли стрелок, стоящий спиной к носу корабля, жаловаться на то, что пущенная им пуля летит медленнее, чем пуля противника?

Конечно, по отношению к поверхности 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,

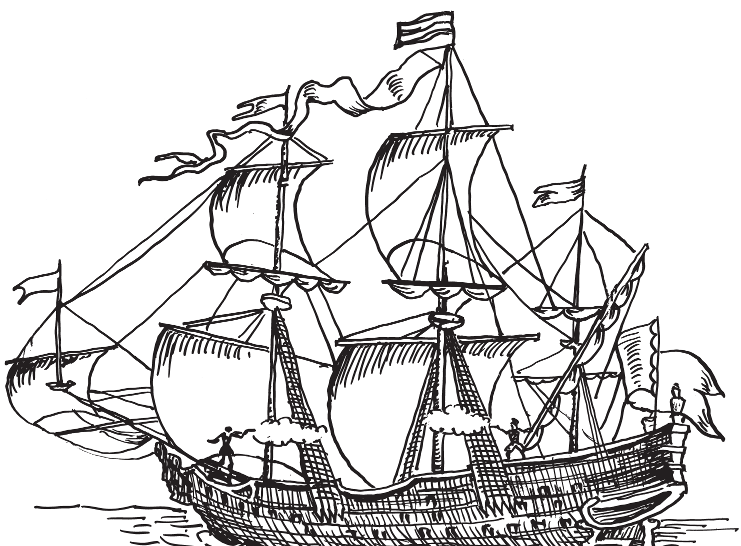


Рис. 2. Чья пуля раньше достигнет противника?

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 едва не привела ее автора на костер инквизиции).

«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 больших 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: «характер движения, совершающегося в какой-либо системе, не зависит от того, находится ли система в покое или перемещается прямолинейно и равномерно относительно земной поверхности».

• 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.

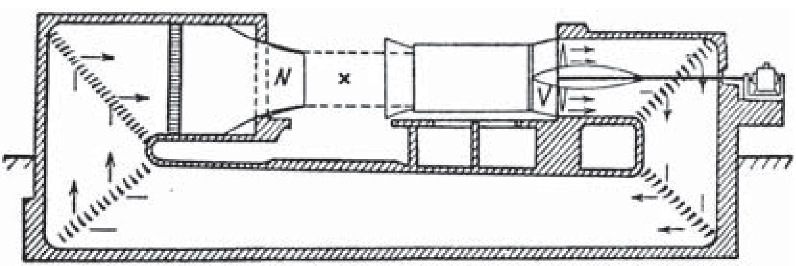


Рис. 3. Продольный разрез через аэродинамическую трубу. Модель крыла или самолета подвешивается в рабочем пространстве, отмеченном крестиком (×). Воздух, засасываемый вентилятором V, движется в направлении, указанном стрелками, выбрасывается в рабочее пространство через суживающийся насадок и затем опять засасывается в трубу.

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.

В настоящее время существуют аэродинамические трубы настолько большого размера, что в них помещается не уменьшенная модель, а корпус самолета с пропеллером или автомобиль средней величины. Скорость воздуха в трубе можно довести до скорости звука.

• На полном ходу поезда

Другой пример плодотворного применения классического принципа относительности возьмем из железнодорожной практики. Тендер иногда 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

Рис. 4. Как паровозы на полном ходу набирают воду. Между рельсами устроен длинный водоем, в который погружается из тендера труба. Вверху налево — трубка Пито. При погружении ее в текущую воду уровень в трубе поднимается выше, чем в водоеме. Вверху направо — применение трубки Пито для набора воды в тендер движущегося поезда.

в трубке поднимается выше уровня водоема. Движение заменяют покоем, а покой движением.

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

Как высоко может быть поднята вода этим оригинальным способом? По законам того отдела механики, который носит название гидромеханики и занимается движением жидкостей, вода в трубке Пито должна подняться на такую же высоту, на какую взлетело бы вверх тело, подброшенное отвесно со скоростью течения воды; если пренебречь потерей энергии на трение, завихрения и т. д., то эта высота H определяется формулой

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

где V — скорость воды, а g — ускорение силы тяжести, равное *9,8 м/с²*. В нашем случае скорость воды по отношению к трубе равна скорости поезда; взяв скромную скорость *36 км/час*, имеем V = *10 м/с*; следовательно, высота поднятия воды

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

Ясно, что каковы бы ни были потери, вызванные трением и другими, не принятыми во внимание обстоятельствами, высота поднятия достаточна для успешного наполнения тендера.

• Как надо понимать закон инерции

Теперь, после того как мы так подробно побеседовали об относительности движения, необходи-

---

[1] Здесь, как и в дальнейшем изложении, км/час обозначает километр в час, м/с соответственно обозначает метр в секунду, а м/с^2 — единицу ускорения, т. е. ускорение такого равнопеременного движения, при котором скорость изменяется на 1 м/с за 1 секунду.

мо сказать несколько слов о тех причинах, которые вызывают движение, — о силах. Прежде всего нужно указать на закон независимости действия сил. Он формулируется так: *действие 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 классической механики. Первый — закон инерции; третий — закон равенства действия и 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 которого 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 и вес — совсем не одно и то же. 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 человека, не изучавшего физики, наиболее понятен из всех трех законов[1]. Однако иные понимают его совершенно превратно. Именно, инерцию определяют нередко как свойство тел «сохранять 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 совершает криволинейное движение;

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

---

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

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 как будто никакого движения оно вызвать не может. Трение есть сила потому, что оно замедляет движение.

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).

Неудачным также является часто встречающийся термин «тело противодействует приложенной силе». Ведь с одинаковым основанием можно было бы сказать, что чай в стакане противодействует тому, чтобы стать сладким, когда в нем размешивают сахар.

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 совершенно 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 усилие действует в две противоположные стороны; оно имеет, выражаясь образно, два конца (две силы): один приложен к телу, на которое, как мы говорим,

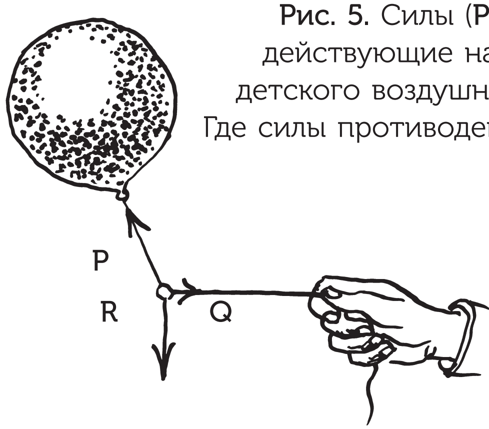


Рис. 5. Силы (P, Q, R), действующие на грузик детского воздушного шара. Где силы противодействующие?

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»*.

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 нити, через которую

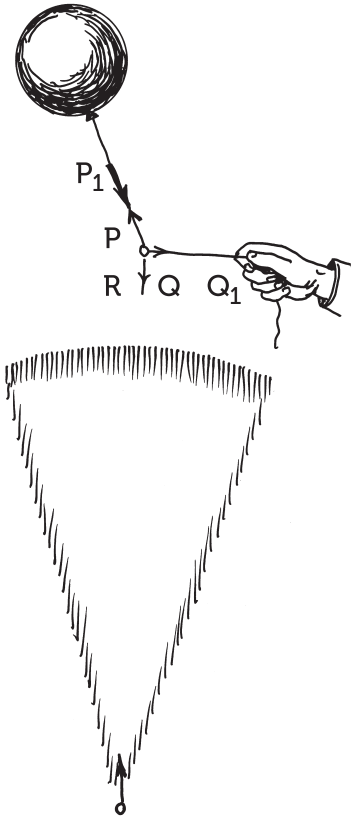


Рис. 6. Ответ на вопрос предыдущего рисунка: силы противодействующие: P_1, Q_1 и R_1.

она передается воздушному шарику (рис. 6, сила P_1); сила, противоположная силе Q, действует на руку (Q_1); сила, противоположная силе R, приложена к Земле (сила R_1, рис. 6), потому что грузик не только притягивается Землей, но и сам ее притягивает.

Еще одно существенное замечание. Когда мы спрашиваем о величине натяжения веревки, которая растягивается двумя силами в 1 кг, приложенными к концам веревки, 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 пружинные весы с силой 100 кг каждая (рис. 7). Что показывает стрелка весов?

РЕШЕНИЕ

Многие отвечают: 100 + 100 = 200 кг. Ответ неверен. Силы по 100 кг, с которыми тянут лошади, вызывают, как мы только что видели, натяжение не в 200, а только в 100 кг.

Поэтому, между прочим, когда магдебургские полушария растягивались восемью лошадьми, которые тянули в одну сторону, и восемью — в противоположную, то не следует думать, что они растягивались силой шестнадцати лошадей. При отсутствии противодействующих восьми лошадей остальные восемь не произвели бы на полушария ровно никакого действия. Одну восьмерку лошадей можно было бы заменить просто достаточно устойчивой стеной.

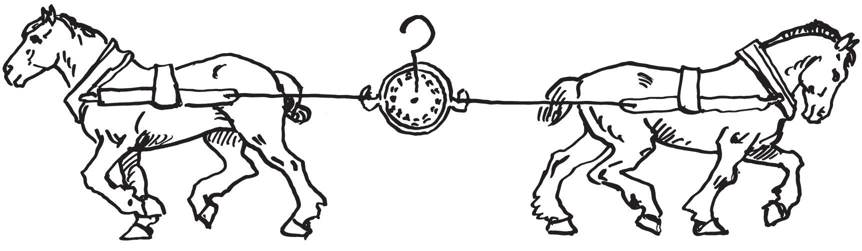


Рис. 7. Каждая лошадь тянет с силой 100 кг. Сколько показывают пружинные весы?

- **Задача о двух лодках**

К пристани на озере приближаются две одинаковые лодки (рис. 8). 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?

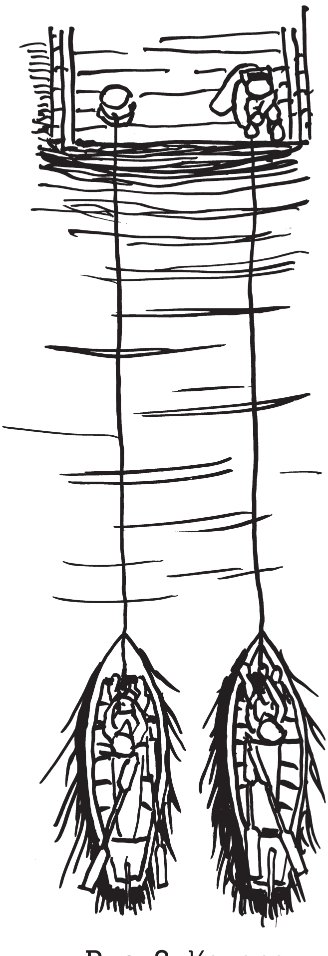


Рис. 8. Которая из лодок причалит раньше?

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 такое же, как и для первой лодки. Обе лодки подтягиваются с равной силой и причалят *одновременно*[1].

• Загадка пешехода и паровоза

Бывают случаи, — в 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 представляет 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.

---

[1] С таким решением не согласился один из читателей, высказавший соображение, которое, возможно, возникнет и у других при чтении этой книги:

«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 надлежащим образом увеличенной 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.

Но если внутренние силы неспособны перемещать *все* тело, то как же движется пешеход? Как движется паровоз? Сказать, что пешеходу помогает трение ног о землю, 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 («как корова на льду», говорит распространенная поговорка) и что паровоз, находясь на скользких рельсах (например, при обледенении), «буксует»; это значит, что колеса паровоза вертятся, но паровоз с места не двигается. Каким же образом трение, которое, как мы видели (см. «Как надо понимать закон инерции»), замедляет существующее движение, может помочь пешеходу или паровозу сдвинуться с места?

Загадка разрешается довольно просто. Две внутренние силы, действуя одновременно, не могут сообщить телу движения, так как эти силы лишь сближают или раздвигают отдельные части тела. 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 возможность другой силе двигать тело.

Представьте себе, что вы стоите на очень гладкой поверхности, например на льду, и хотите сдвинуться с места. Вы делаете усилие, чтобы занести правую ногу вперед. Между отдельными частями вашего тела начинают действовать вну-

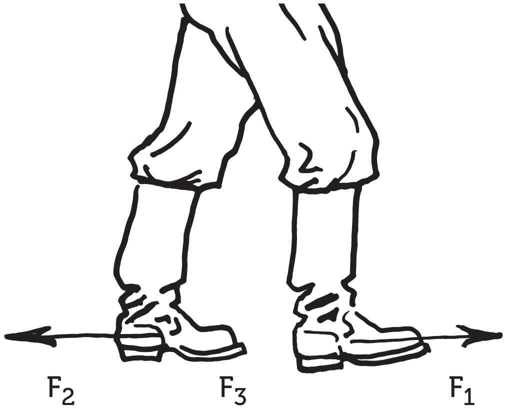


Рис. 9. Сила трения F_3 делает возможной ходьбу.

тренние силы, подчиняющиеся закону равенства действия и противодействия. Этих сил много, но действие их будет приблизительно такое же, как если бы на ваши ноги действовали только две силы, из которых одна F_1 толкает правую ногу вперед, а другая F_2, равная и противоположная первой, толкает левую ногу назад. Результатом действия этих сил будет только то, что обе ваши ноги подвинутся: одна вперед, другая назад, ваше же тело или, лучше сказать, его центр тяжести останется на месте. Иначе будет обстоять дело, если левая нога опирается на шероховатую поверхность (лед под ногой посыпан песком). Тогда сила F_2, действующая на левую ногу, уравновесится (полностью или частично) силой трения F_3, действующей на подошву левой ноги, а сила F_1, приложенная к правой ноге, подвинет ее вперед, и центр тяжести всего тела также переместится вперед (рис. 9). Практически при ходьбе мы, занося одну ногу вперед, приподнимаем ее и тем устраняем трение между этой ногой и полом, в то время как на вторую ногу действует сила трения, которая препятствует скольжению этой ноги назад.

С паровозом дело обстоит несколько сложнее, но и тут вопрос сводится к тому, что сила трения, приложенная к ведущим колесам паровоза, уравновешивает одну из внутренних сил, давая тем самым возможность другой силе двигать паровоз.

• Странный карандаш

Возьмите длинный карандаш и положите его на вытянутые горизонтально указательные пальцы обеих рук (рис. 10). Приближайте теперь пальцы друг к другу так, чтобы карандаш оставался горизонтальным. Вы тотчас заметите, что карандаш станет скользить сначала по одному пальцу, а затем по другому и т. д. Если вместо карандаша взять длинную прямую палку, то это повторяется довольно много раз.

Чем же объясняется это странное явление?

Разгадать его нам помогут так называемый закон Кулона—Амонтона и закон, гласящий, что сила трения при скольжении меньше, чем сила трения покоя. Закон Кулона—Амонтона утверждает, что сила трения T в тот момент, когда начинается скольжение, равна некоторой числовой величине f, характерной для данных трущихся тел, умноженной на то давление N, которое оказывает тело на опору. Математически этот закон может быть записан в следующем виде:

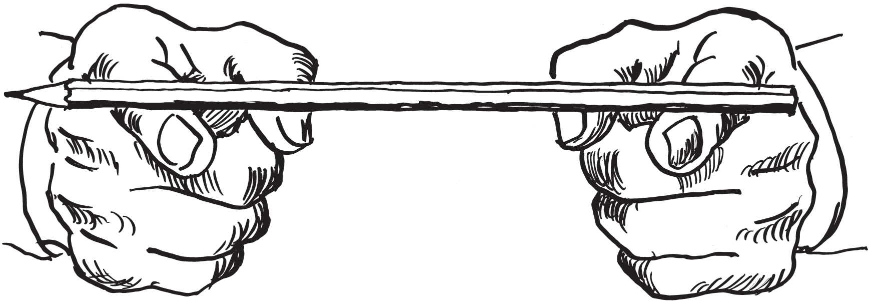


Рис. 10. При сближении пальцев карандаш двигается попеременно то в одну, то в другую сторону.

$$T = f \cdot N.$$

Попробуем теперь объяснить странное поведение карандаша, пользуясь этими двумя законами. Если в самом начале карандаш расположен так, что на один палец он давит больше, чем на другой, а это почти всегда так случится, то и сила трения на первом пальце будет больше, чем на втором. Это непосредственно видно из формулы Амонтона. Эта сила трения и не позволит карандашу скользить по той опоре, давление на которую больше. Когда пальцы сближаются, центр тяжести карандаша приближается к скользящей опоре, и давление на нее возрастает. Но сила трения при скольжении меньше, чем при покое, поэтому скольжение будет еще долго продолжаться. В тот момент, когда давление на скользящей опоре значительно увеличится, скольжение на ней прекратится: его остановит увеличившаяся сила трения. Скользящей опорой станет другой палец. Далее явление повторится, и обе опоры станут чередоваться.

• 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 для приведения в движение какого-либо тела с определенной скоростью требуется определенный промежуток времени. Никакая сила, даже самая большая, не может мгновенно сообщить телу заданную скорость, как бы ни была ничтожна его масса. Мысль эта заключена в краткой формуле $Ft = mv$, о которой мы будем говорить в следующей главе, но которая, будем надеяться, знакома читателю из учебника физики. Ясно, что при $t = 0$ (время равно нулю) произведение mv массы на скорость равно нулю и, следовательно, равна нулю скорость, так как масса всегда отлична от нуля. 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 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, можно прибавить, 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 прилагать добавочную силу для приведения вагона в движение с заданной скоростью (сила 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

В настоящей книге нам не раз придется обращаться к формулам из механики. Для читателей, хотя и проходивших механику, но забывших эти соотношения, дана на следующей странице 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 постоянную силу F на путь S, получаем работу A, которая в то же время равна и полу-произведению массы m на квадрат конечной скорости v:

$$A = FS = \frac{mv^2}{2}.\text{[1]}$$

	Скорость V	Время t	Масса T	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

Подобно тому как, пользуясь таблицей умножения, можно узнавать результаты *деления*, так и из

---

[1] Формула $A = FS$ верна лишь в том случае, когда напрvавление 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

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

нашей таблички можно извлечь, например, следующие соотношения:

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

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

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{и} \quad m = \frac{F}{a}.$$

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

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

а из этих формул получаете:

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

Среди написанных формул ищете ту, которая отвечает условиям задачи.

Если пожелаете иметь все уравнения, с 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 физического смысла.

• Отдача огнестрельного оружия

В качестве примера применения нашей таблицы рассмотрим «отдачу» ружья. Пороховые газы, выбрасывающие своим напором пулю в одну сторону, в то же время отталкивают ружье в противоположную сторону, порождая всем известную «отдачу». С какой скоростью движется ружье при отдаче? Вспомним закон равенства действия и

Рис. 11. Почему ружье при выстреле отдает?

противодействия. По этому закону давление пороховых газов на ружье (рис. 11) должно быть равно давлению пороховых газов на 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:

$$Ft = mv.$$

Это равенство является математическим выражением закона количества движения для случая, когда тело начинает двигаться из состояния покоя. В более общем виде этот закон формулируется так: изменение количества движения тела за некоторое время равно импульсу силы, приложенной к телу за то же время:

$$mv - mv_0 = Ft,$$

где v_0 — начальная скорость, а F — постоянная сила.

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 вылете — 880 м/с; масса винтовки — 4500 г. Значит,

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

Следовательно, скорость ружья w = 1,9 м/с. Нетрудно вычислить, что отдающее ружье несет с собой примерно в 470 раз меньшую «живую силу», 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 сильно ударить и даже поранить.

Для полевой скорострельной пушки, весящей 2000 кг и выбрасывающей 6-килограммовые снаряды со скоростью 600 м/с, скорость отдачи примерно такая же, как и у винтовки, — 1,9 м/с. 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 при выстреле откатывались 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 не одинаковой *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 люди, мало знакомые с механикой, думают иногда, что равенство количеств движения (а значит, и равенство импульсов) обусловливает собой равенство кинетической энергии. Известны случаи, когда изобретатели, исходя из ошибочного предположения, что равным импульсам соответствуют равные количества работы, пытались придумать машину, которая давала бы работу без соответствующей затраты энергии. Это лишний раз доказывает необходимость для изобретателя хорошо усвоить основы теоретической механики.

• Повседневный опыт и научное знание

При изучении механики поражает то, что во многих весьма простых случаях наука эта резко расходится с обыденными 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.

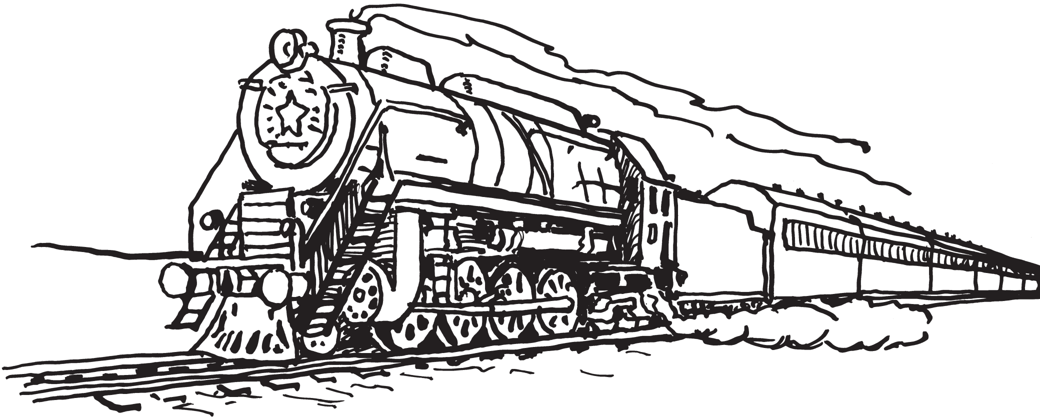


Рис. 12. При равномерном движении поезда сила тяги преодолевает сопротивление движению.

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. «Как надо понимать закон инерции»).

Неужели же обыденные наблюдения так грубо ошибочны?

Нет, они не вполне ошибочны, но относятся к весьма ограниченному кругу явлений.

Обыденные наблюдения делаются над телами, перемещающимися при наличии 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 нужна здесь не для того, чтобы двигать тело, а для того, чтобы преодолевать сопротивление движению, 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 обыденная «механика»: ее утверждения почерпнуты из н*едостаточно полного* 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 добытое таким путем знание раскрывает глубокие корни явлений и может быть плодотворно применено на 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/с. Перенесите его мысленно на Луну, где все тела становятся в шесть раз легче. С какой скоростью снаряд покинет там это орудие? (Различие, обусловленное отсутствием на Луне атмосферы, оставим без внимания.)

РЕШЕНИЕ

На вопрос этой задачи часто отвечают, что так как сила давления пороховых газов 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: $900 \cdot 6 = 5400$ м/с. Снаряд вылетит на Луне со скоростью 5,4 км/с.

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 *не с весом, а с массой:* $F = ma$. Но масса снаряда на Луне нисколько не изменилась: она там та же, что и на Земле; значит, и ускорение, сообщаемое снаряду силой давления пороховых газов, должно быть на Луне такое же, как и на Земле; а при одинаковых ускорениях и путях одинаковы и скорости (согласно формуле $v = \sqrt{2aS}$, где S обозначает путь снаряда внутри дула орудия).

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 уменьшение тяжести имеет уже существенное значение.

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

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

которую мы находим в справочной табличке (в начале второй главы). 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 на Земле мы не принимали во внимание), несмотря на то, что начальная скорость снаряда в обоих случаях одинакова.

• Выстрел на дне океана

Одно из наиболее глубоких мест океана находится близ острова Минданао в группе Филиппинских островов. Его глубина составляет приблизительно 11 км. Пусть на этой глубине очутился заряженный духовой пистолет; в его цилиндре находится воздух под большим давлением.

Спрашивается, вылетит ли пуля из пистолета, если нажать на собачку, считая, что в обычных условиях пуля вылетает из него с той же скоростью, что и из нагана, т. е. 270 м/с.

РЕШЕНИЕ

Пуля находится в момент «выстрела» под действием двух противоположных давлений: давления воды и давления сжатого воздуха. Если первое давление больше второго, то пуля не вылетит, в обратном случае она вылетит. Следовательно, нужно подсчитать оба давления и сравнить их.

Давление воды на пулю подсчитываем так. Каждые 10 м водяного столба оказывают давление в одну техническую атмосферу, т. е. 1 кг на 1 кв. см. Следовательно, 11 000 м водяного столба окажут давление в 1100 кг на 1 кв. см. Положим, что калибр (диаметр отверстия ствола) пистолета тот же, что и у обычного нагана, т. е. 0,7 см. Площадь поперечного сечения канала ствола равна:

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

На эту площадь приходится сила давления воды, равная

$$1100 \cdot 0{,}38 = 418 \text{ кг.}$$

Подсчитываем теперь, с какой силой давит сжатый воздух. Для этого найдем среднее ускорение пули в стволе (для обычных условий), принимая ее движение за равноускоренное. Фактически движение не будет равноускоренным, но мы вводим это допущение для упрощения задачи.

Находим в табличке в начале второй главы соотношение

$$v^2 = 2aS,$$

где v — скорость пули у дульного обреза, a — искомое ускорение, S — длина пути, пройденного пулей под давлением воздуха, т. е. длина ствола. Подставив v = 270 м/с = 27 000 см/с и S = 22 см, получим:

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

откуда

$$a = 16\ 500\ 000 \text{ см/с}^2.$$

Это огромное ускорение нас не должно удивлять, ведь в обычных условиях пуля проходит по каналу пистолета за очень малое время. Зная ускорение пули и положив ее массу равной 7 г, вычислим ту силу, которая это ускорение вызывает, по формуле $F = ma$:

$$F = 7 \cdot 16\ 500\ 000 = 115\ 500\ 000 \text{ дин} = 1150 \text{ Н}.$$

Сила веса в один килограмм равна примерно 10 Н, значит, воздух давит на пулю с силой, приблизительно равной весу 115 кг.

Итак, в момент выстрела пулю толкает сила в 115 кг, противодействует же сила давления воды, равная 418 кг. Отсюда видно, что пуля не только не вылетит, а, наоборот, давление воды загонит ее глубже в дуло. Такое давление, конечно, не возникает в духовых пистолетах, но такой пистолет, который «конкурировал» бы с наганом, в условиях современной техники изготовить можно.

- **Сдвинуть земной шар**

Среди людей, недостаточно 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:

$$F = ma,$$

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 мы очень редко имеем дело со свободным телом; движение почти всех наблюдаемых нами тел не свободно. Чтобы в условиях трения заставить тело двигаться, необходимо приложить силу, которая больше силы 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 приблизительно 34% веса тела. Но если бы никакого трения не было, то даже ребенок привел бы в движение 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: двигаясь сами, вы приведете его в движение!

Например, когда мы подпрыгиваем, отталкиваясь ногами от земного шара, мы, сообщая скорость своему телу, вместе с тем приводим в движение в противоположном направлении и земной шар. Но вот вопрос: какова скорость этого движения? По закону равенства действия и противодействия сила, с которой мы давим на Землю, равна силе, которая подбросила вверх наше тело. Поэтому и импульсы этих сил равны, а если так, то равны по величине и количества движения, получаемые нашим телом и земным шаром. Обозначая массу Земли через M, приобретенную ею скорость через w, массу человека через m, а его скорость через v, мы можем написать

$$Mw = mv,$$

Откуда

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

Так как масса Земли неизмеримо больше массы человека, то скорость, которую мы сообщаем

Земле, неизмеримо меньше скорости, с которой отделяется от Земли человек. Мы говорим «неизмеримо больше», «неизмеримо меньше», конечно, не в буквальном смысле. Измерить массу земного шара возможно[1], а следовательно, возможно определить и скорость его в данных условиях.

Масса M Земли равна приблизительно $6 \cdot 10^{27}$ г, массу m человека возьмем равной 60 кг = $6 \cdot 10^4$ г. Тогда отношение $\frac{m}{M}$ равно $\frac{1}{10^{23}}$. Это значит, что скорость земного шара в 10^{23} раз меньше скорости прыжка человека! Пусть человек подпрыгнул на высоту h = 1 м, тогда его начальная скорость может быть определена по формуле

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

т. е.

$$v = \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 100} \approx 440 \text{ см/с},$$

и скорость Земли равна:

$$w = \frac{440}{10^{23}} = \frac{4,4}{10^{21}} \text{ см/с}.$$

Это настолько маленькая величина, что невозможно себе ее представить, но все же величина, отличная от нуля. Чтобы получить хотя бы косвенно представление об этой величине, предположим, что Земля, приобретя такую скорость, сохраняет ее в течение очень большого промежутка времени, например одного миллиарда лет. На какое расстояние переместится она за это время?

---

[1] См. об этом в «Занимательной астрономии» того же автора статью «Как взвесили Землю».

Это расстояние найдем по формуле

$$S = vt.$$

Взяв

$$t = 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \approx 31 \cdot 10^{14} \text{ с},$$

получим:

$$S = \frac{4{,}4}{10^{21}} \cdot 31 \cdot 10^{14} = \frac{14}{10^6} \text{ см}.$$

Выразив это расстояние в микронах (тысячных долях миллиметра), получим:

$$S = \frac{14}{10^2} \text{ микрона}.$$

Итак, найденная нами скорость настолько мала, что, если бы Земля двигалась с этой скоростью равномерно в течение 1 миллиарда лет, она сдвинулась бы меньше чем на одну шестую микрона, т. е. расстояние, неразличимое невооруженным глазом.

На самом же деле скорость, полученная Землей в результате толчка, произведенного ногами человека, не сохраняется. Как только ноги человека отделятся от Земли, движение его начинает замедляться под действием притяжения Земли. Но если Земля притягивает человека с силой в 60 кг, то с такой же силой притягивает и человек Землю, а следовательно, одновременно с уменьшением скорости человека убывает и скорость, приобретенная Землей, и обе одновременно обращаются в нуль.

Таким образом, на короткий срок человек может сообщить Земле скорость, хотя и ничтожно малую, но не может вызвать перемещения ее.

Человек мог бы сдвинуть земной шар силой своих мускулов, но только в том случае, если бы он мог найти опору, не связанную с Землей, как это показано на фантастическом рисунке на заставке к этой главе. Но при всем богатом воображении художника он, конечно, не мог показать, на что опираются ноги человека.

• 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.

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 достигли земли, их общий центр тяжести продолжает двигаться по тому же пути, по какому двигался центр тяжести целой бомбы (если пренебречь сопротивлением воздуха). 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.

В предыдущей статье мы говорили о том, что человек, находящийся на земной поверхности, не может своими усилиями вызвать хотя бы самое малое перемещение Земли. Это объясняется законом движения центра тяжести. Силы, которыми действует человек на Землю и Земля на человека, суть силы внутренние, а следовательно, они не могут вызвать перемещения общего центра тяжести Земли и человека. Когда человек возвращается к своему прежнему положению на земной поверхности, возвращается к прежнему положению и Земля.

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 (рис. 13), состоящую из двух частей: горизонтальной прямой *AB* и дугообразной части *ACB* — над ней. В трубах находится жидкость, которая непрерывно течет в одном направлении (течение поддерживается вращени-

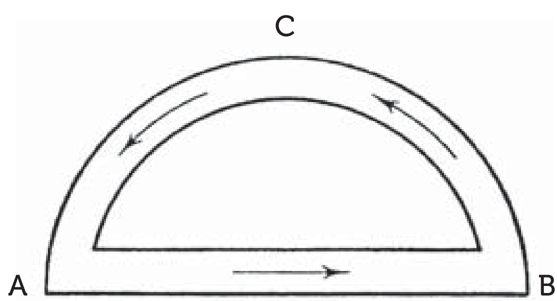


Рис. 13. Проект летательного аппарата нового типа.

ем винтов, размещенных в трубах). Течение жидкости в дугообразной части *ACB* трубы сопровождается центробежным давлением на наружную стенку. Получается некоторое усилие *P* (рис. 14), 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.

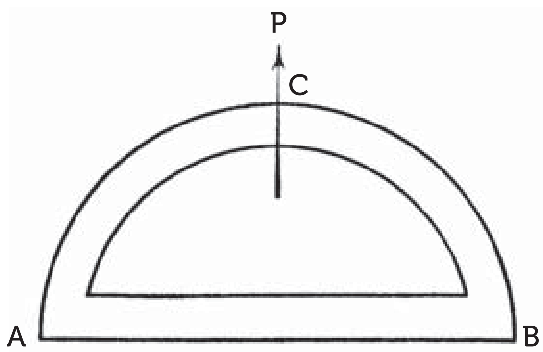


Рис. 14. Сила P должна увлекать аппарат вверх.

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.

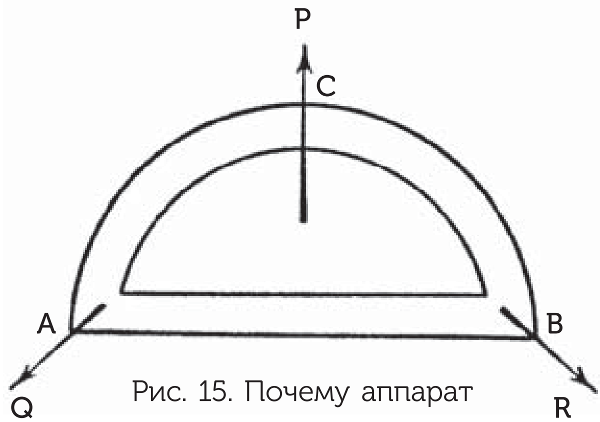


Рис. 15. Почему аппарат не взлетает.

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. 15). 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. Например, ракета долетает до Луны под 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 инерции всей системы остается там, где он был до вылета 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 идти о сохранении центра инерции[1]

[1] Если речь идет о системе, состоящей из нескольких тел или многих частиц, то в механике часто говорят не о центре тяжести, а о центре инерции системы. Для систем, небольших по сравнению с Землей, можно считать, что центр инерции совпадает с центром тяжести.

огромной системы Земля — ракета. Вследствие удара газовой струи о Землю (или об ее атмосферу) наша планета несколько смещается, центр инерции 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 Луну. 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 инерции не теряет своего смысла.

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 результаты: 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: в Орджоникидзе на 37", в Батуми на 39". 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 Земли. Вот почему в Москве, вдали от всяких гор, отвес все же отклоняется к северу на 10". Как мы видим, отвес может служить инструментом, помогающим судить о строении земных недр.

Еще больше в этом отношении может дать маятник. Этот прибор обладает следующим свойством: если размах его качаний не превышает нескольких градусов, то *продолжительность* одного качания почти не зависит от величины размаха: и большие и малые качания длятся одинаково. Продолжительность качания зависит от других обстоятельств: *от длины маятника и от ускорения*

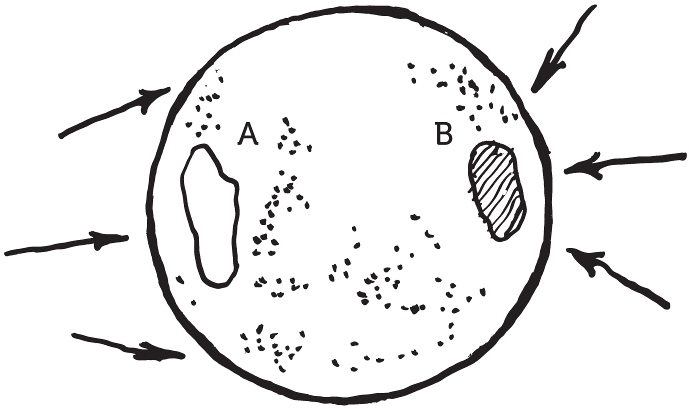


Рис. 16. Пустоты (А) и уплотнения (В) в толще земного шара отклоняют отвес.

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, при малых колебаниях такова:

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

При этом, если длина l маятника берется в метрах, то ускорение g силы тяжести следует брать в метрах в секунду за секунду.

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 больше, 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

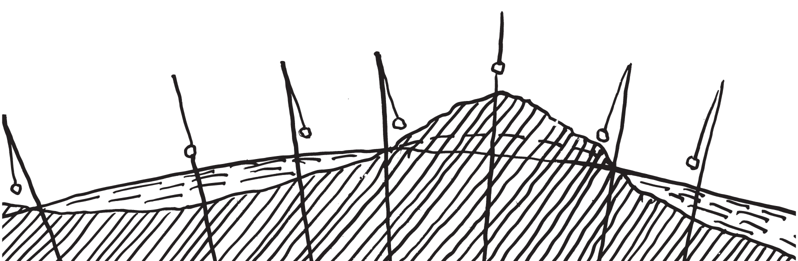


Рис. 17. Схема профиля земной поверхности и направления отвесов.

несколько строк отчета одного из ее исследователей[1].

«...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 запасам железной руды, которые обнаружены в районе Курской аномалии и которые исчисляются десятками мил-

---

[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 триллионной (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. 18. Коромысло M_1E из тонкой алюминиевой трубки имеет длину около 40 см: к одному концу коромысла прикреплён золотой груз M_1 цилиндрической формы весом в 30 г, к другому подвешивается на проволоке EM_2 золотой подвесок M_2 также весом в 30 г. Коромысло подвешено на весьма тонкой платиновоиридиевой нити AO длиной 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».

лиардов 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».

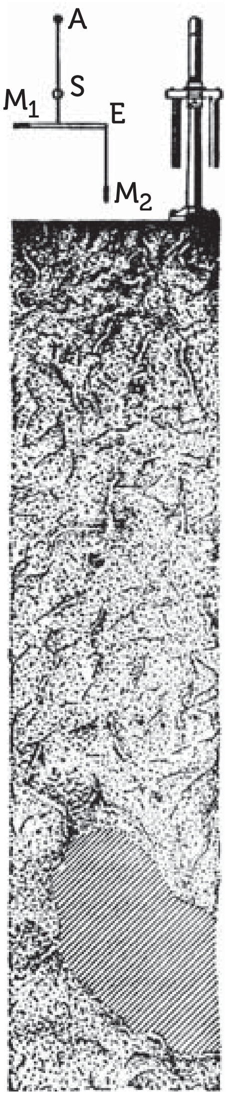


Рис. 18. Вверху справа — вариометр. Вверху слева — схема устройства прибора.

Перед нами два из многочисленных примеров практического применения физики в других, казалось бы, далеких от нее областях. В настоящее время наука получила еще один тонкий метод регистрации аномалий силы тяжести. На движении искусственных спутников Земли сказывается как отклонение нашей планеты от правильной шарообразной формы, так и наличие неоднородностей в ее строении. Когда искусственный спутник пролетает над горным хребтом или над местом, где залегают породы большой плотности, он теоретически должен несколько снизиться и ускорить свое движение под действием местного избытка притягивающей массы. Правда, регистрация этих эффектов возможна практически лишь в том случае, если спутник летит достаточно высоко над земной поверхностью, чтобы сопротивление атмосферы не затушевывало общей картины его движения.

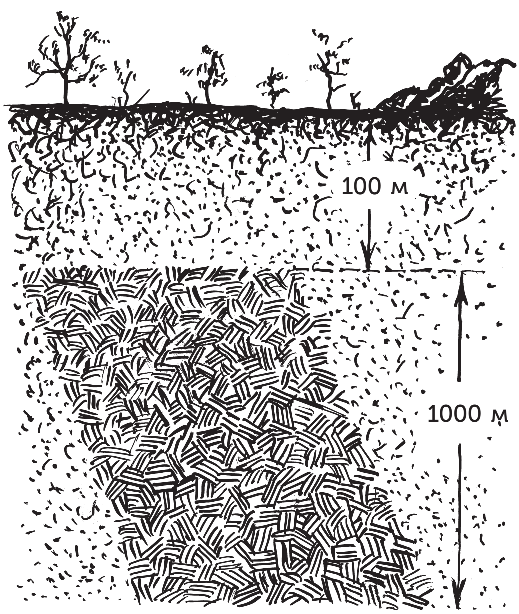


Рис. 19. Причина Курской аномалии: шток железной руды мощностью около тысячи метров на глубине ста метров.

• Маятник в воде

ЗАДАЧА

Вообразите, что маятник стенных часов качается в воде. Чечевица его имеет «обтекаемую» форму, которая сводит почти к нулю сопротивление воды движению чечевицы. 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 малосопротивляющейся среде, то, казалось бы, нет причины, которая могла бы заметно изменить скорость его качания. Между тем опыт показывает, что маятник в таких условиях качается медленнее, чем это может быть объяснено сопротивлением среды.

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,

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{l}{g}}$, 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 (см. рис. 20). 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. 21) можно представить себе разложенным на две составляющие силы: *Q* и *R*. Сила *R* 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 равенства скоростей движения сосуда и воды). 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 жидко-

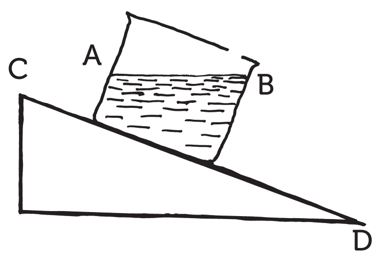


Рис. 20. Сосуд с водой скользит под уклон. Как расположится уровень воды?

сти: 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?

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 (классический принцип относительности).

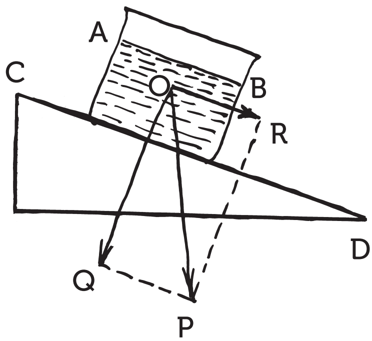


Рис. 21. Решение задачи рис. 20.

Но следует ли это также из приведенного ранее объяснения? Конечно. Ведь в случае *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 горизонтально. Только в самом начале движения, когда сосуд, до получения постоянной скорости, еще движется ускоренно[1], уровень воды принимает на короткое время 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.

Надо заметить, что вообще всякий раз, когда мы не сознаем уклонения нашего собственного

---

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

тела от отвесного положения, мы приписываем наклон окружающим предметам. Летчику на вираже и человеку, катающемуся на карусели, кажется, что наклоняется вся окрестность.

Горизонтальный пол может утратить для вас свое горизонтальное положение даже и в том случае, когда вы движетесь не по наклонному, 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 *замедленно* или *ускоренно*.

Когда поезд начинает замедлять свой ход, мы можем сделать удивительное наблюдение: нам кажется, что пол понижается в направлении движения поезда, 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, 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 желобах вагонов: когда поезд в дождь подходит к станции, вода из желобов на вагонных крышах стекает вперед, а при отходе поезда — назад. Происходит это оттого, что поверхность воды поднимается у края, противоположного направлению ускорения поезда.

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 как бы подвержены действию двух сил: силы *R* (рис. 22), *направленной противоположно 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 сто-

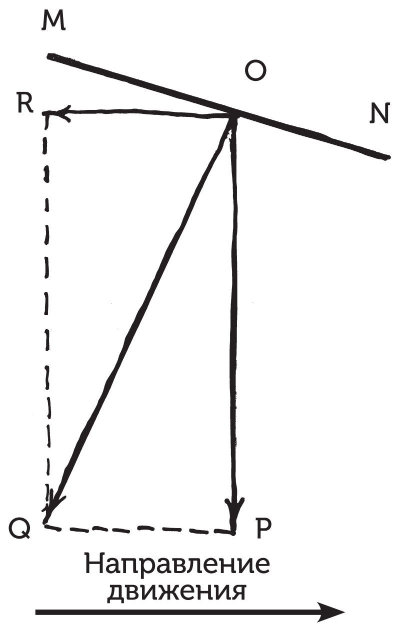


Рис. 22. Какие силы действуют на предметы в вагоне трогающегося поезда?

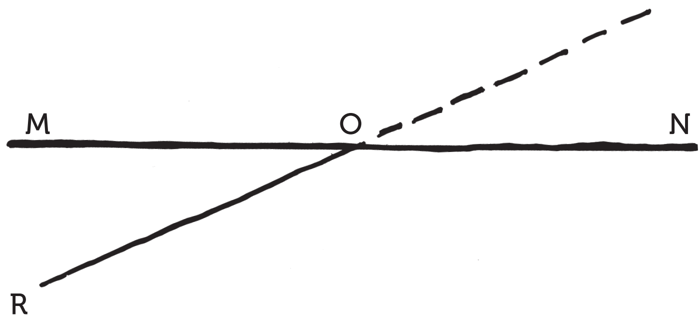


Рис. 23. Почему пол трогающегося вагона кажется наклонным?

рону движения поезда и имеющим уклон в обратном направлении (рис. 23).

Что произойдет при таких условиях с жидкостью в тарелке? Ведь новое «горизонтальное» направление не совпадает с первоначальным уровнем жидкости, а следует (рис. 24, *а*) по линии *MN*. Это наглядно видно на рисунке, где стрелка указывает направление движения вагона. Картину всех явлений, происходящих в вагоне в момент отправления, легко представить себе, если вообразить, что вагон наклонился соответственно новому положению «горизонтальной» линии (рис. 24, *б*). Теперь ясно, почему вода должна вылиться через задний край тарелки (или дождевого желоба). Вы поймете также, почему стоящие в вагоне люди должны при этом упасть назад (см. заставку этой главы).

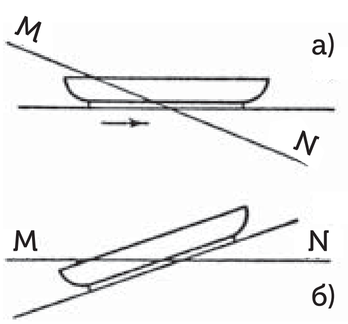


Рис. 24. Почему в трогающемся вагоне жидкость переливается через задний край блюдца?

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:

«Пусть сосуд с водою имеет поступательное, но неравномерное движение, меняющее скорость и то ускоренное, то замедленное. Вот какие будут последствия неравномерности. Вода не вынуждена разделять движения сосуда. При уменьшении скорости сосуда она сохраняет приобретенное стремление и притечет к переднему концу, где и образуется поднятие. Если, напротив того, скорость сосуда увеличивается, вода сохранит более медленное движение, отстанет и при 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 м/с^2, то угол *QOP* (рис. 22) между новым и старым отвесным направлением легко вычислить из треугольника QOP, где $QP : OP = 1 : 9{,}8 \approx 0{,}1$ (сила пропорциональна ускорению):

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

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, участвующему в ускоренном движении.

• Магнитная гора

В Калифорнии есть гора, о которой местные автомобилисты утверждают, что она обладает магнитным и свойствами. Дело в том, что на небольшом участке дороги длиной 60 м у подножия этой горы наблюдаются необыкновенные явления. Участок этот идет наклонно. Если у автомобиля, едущего вниз явно по наклону, выключить мотор, то машина катится назад, т. е. вверх по уклону, как бы подчиняясь «магнитному притяжению» горы.

Это поразительное свойство горы считалось установленным настолько достоверно, что в соот-

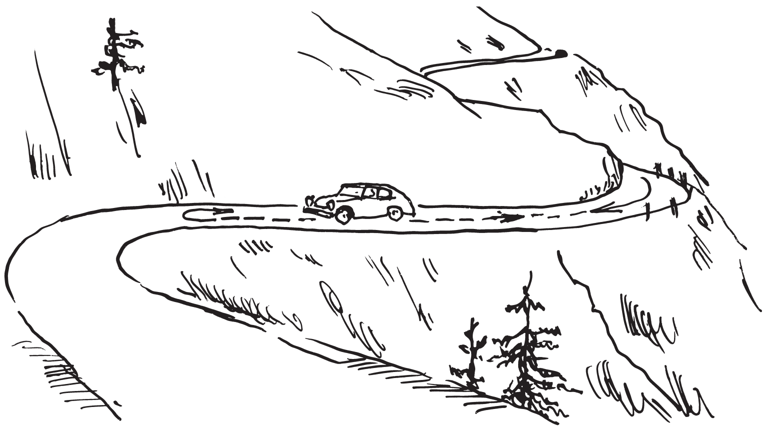


Рис. 25. Мнимая магнитная гора в Калифорнии.

ветствующем месте дороги красуется даже доска с описанием феномена.

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

Иллюзией зрения объясняются также рассказы путешественников о реках, вода которых течет вверх по уклону. Привожу выписку об этом из книги одного 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. 26. Слабо наклонная дорога вдоль ручья.

Объясняется эта иллюзия тем, что мы принимаем дорогу, по которой идем, 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.

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

«При спуске по слабо наклонной дороге, идущей вдоль ручья (рис. 26), который имеет еще меньшее падение, т. е. течет почти горизонтально, — нам часто кажется, что ручей течет вверх по уклону (рис. 27). 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).

Рис. 27. Пешеходу на дороге кажется, что ручей течет вверх.

• **Задача о железном пруте**

Железный прут просверлен строго посередине. Через отверстие проходит тонкая прочная спица, вокруг которой, как вокруг горизонтальной оси, прут может вращаться (рис. 28). В каком положении остановится прут, если его завертеть?

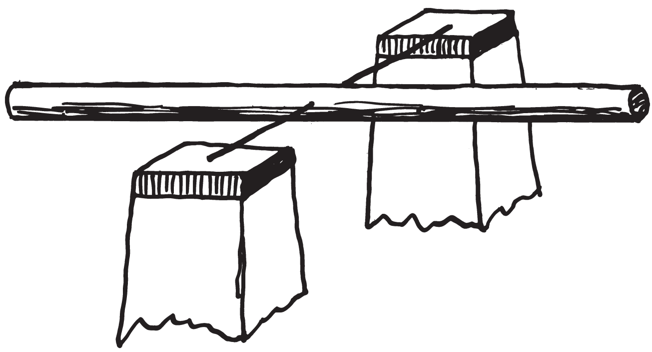


Рис. 28. Прут уравновешен на оси. Если его завертеть, в каком положении он остановится?

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 любом 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.

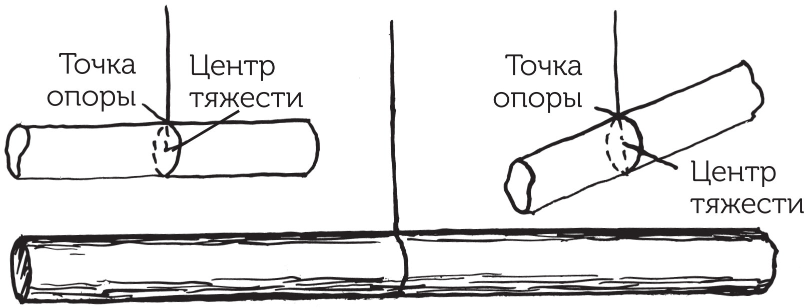


Рис. 29. Почему палка, подвешенная за середину, занимает горизонтальное положение?

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 равновесии. Палка же, подвешенная на нити, имеет точку привеса не в центре тяжести, а выше его (рис. 29). 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. 29). 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

Эти сказочные сапоги в свое время реально осуществлялись в своеобразной форме: в виде дорожного чемодана средних размеров, содержащего в себе оболочку маленького аэростата и прибор для добывания водорода. В любой момент спортсмен мог извлечь из небольшого чемодана оболочку, наполнить ее водородом и сделаться обладателем воздушного шара 5 м в диаметре. Подвязав себя к этому шару, человек совершал огромные прыжки в высоту и в длину. Опасность быть совсем увлеченным ввысь не угрожала такому аэронавту, потому что подъемная сила шара все же была 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 большие?

Посмотрим.

Рис. 30.
Шар-прыгун.

Человек, привязанный к аэростату, увлекается вниз вместе с шаром силой в 1000 г или около 10 *Н*. Вес самого шара-прыгуна приблизительно 20 кг. Значит, сила в 10 *Н* действует на массу в 20 + 60 = 80 кг. Ускорение *a*, приобретаемое массой в 80 кг от силы в 10 *Н*, равно:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{10}{80} \approx 0{,}12 \text{ м/с}^2.$$

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

$$v^2 = 2 \cdot 9{,}80 \text{ м}^2/\text{с}^2,$$

откуда

$$v \approx 4{,}4 \text{ м/с}.$$

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. (Это следует из формулы $Ft = mv$; сила F и продолжительность t ее действия в обоих случаях одинаковы; значит, одинаковы и количества движения тv; отсюда ясно, что скорость изменяется обратно пропорционально массе.) Итак, начальная скорость при прыжке с шаром равна:

$$4{,}4 \cdot \frac{60}{80} = 3{,}3 \text{ м/с.}$$

Теперь легко, пользуясь формулой $v^2 = 2ah$, вычислить высоту h прыжка:

$$3{,}3^2 = 2 \cdot 12 \cdot h,$$

откуда

$$h \approx 45 \text{ м.}$$

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 0,12 м/с^2 должен длиться (формула $h = \frac{at^2}{2}$)

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9000}{12}} \approx 27 \text{ с.}$$

Чтобы прыгнуть вверх и вернуться, надо затратить 54 с.

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) меньше, чем на нашей планете.

При только что проделанных расчетах, так же как и при следующих далее, мы совершенно пренебрегаем сопротивлением воздуха. В теоретической механике выводятся формулы, которые позволяют определить высоту и время наибольшего поднятия с учетом сопротивления воздуха. При движении в воздухе как высота, так и время наибольшего поднятия оказываются значительно меньше, чем при движении в пустоте.

Любопытно выполнить еще один расчет — определить длину 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 (рис. 31). Разложим ее на две составляющие: вертикальную v_1 и горизонтальную v_2. Они соответственно равны:

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

Через t секунд движение тела вверх прекратится, и в этот момент

$$v_1 = at,$$

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

$$S = 2v_2 t = 2v\cos\alpha \cdot \frac{v\sin\alpha}{a} = \frac{2v^2}{a}\sin\alpha\cos\alpha = \frac{v^2\sin 2\alpha}{a}$$

Это и есть длина прыжка.

Наибольшей величины достигнет она при $\sin 2\alpha = 1$, так как синус не может быть больше единицы. Отсюда $2\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$. 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 = 3,3 м/с, $\sin 2\alpha = 1$, a = 0,12 м/с^2.

Получим:

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

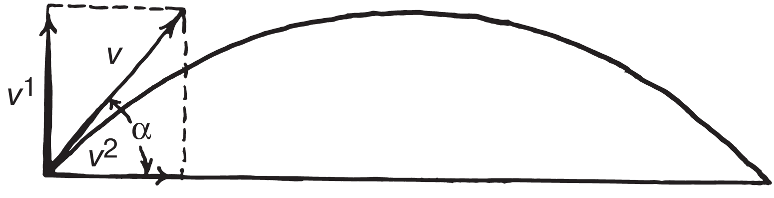


Рис. 31. Как летит тело, брошенное под углом к горизонту.

Прыжки 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-снаряд

«Человек-снаряд» — поучительный номер цирковой программы. 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. 32). Аналогичный номер мы все видели в известном кинофильме «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 настоящий выстрел. Хотя из жерла орудия и вырывается клуб дыма, но артист

---

[1] Полезно запомнить, что вообще наибольшая дальность падения тела, которая получается при бросании тела под углом в 45° к отвесной линии, равна двойной высоте отвесного подъема при той же начальной скорости. В наших предположениях высота отвесного подъема равнялась 45 м.

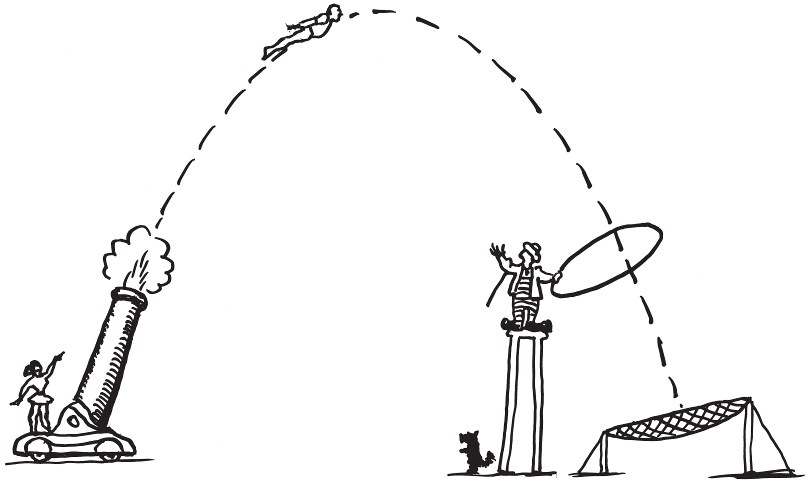


Рис. 32. «Человек-снаряд» в цирке.

выбрасывается не силой порохового взрыва. Дым устраивается лишь для эффекта, чтобы поразить зрителей. На деле же движущей силой является пружина, одновременно со спуском которой появляется бутафорский дым: создается иллюзия, что человек-снаряд выстреливается пороховым зарядом.

На рис. 33 изображена схема описываемого циркового номера. Вот числовые данные о номере, выполняемом искуснейшим из «людей-снарядов», артистом Лейнертом, который выступал в наших цирках:

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

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 увеличенная тяжесть. Затем, во время свободного полета артист как бы ничего не весит. Наконец, в момент падения на сетку артист снова подвергается действию увеличенной тяжести. Названный выше артист переносил все это без вреда для здоровья. Интересно в точности установить эти условия, так как будущие астронавты, которые отважатся отправиться на ракетном корабле в мировое пространство, должны будут переживать подобные же ощущения.

В течение того непродолжительного времени, пока двигатели космического корабля будут действовать, разгоняя его до необходимой скорости, астронавты будут ощущать свой увеличенный вес. После же выключения двигателей («после выхода на траекторию») астронавты окажутся в условиях

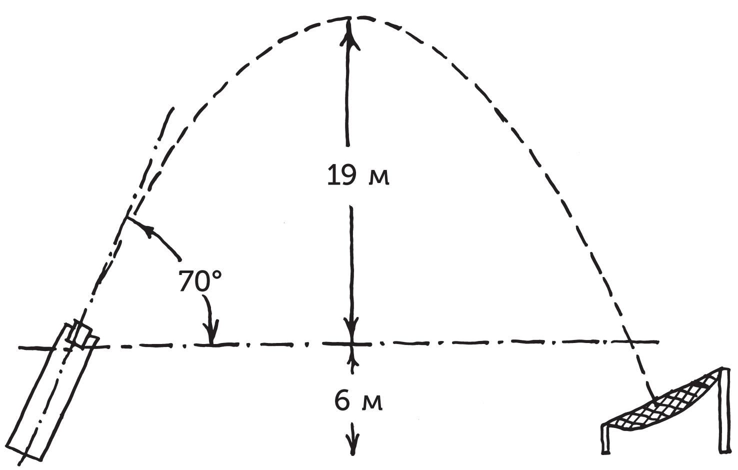


Рис. 33. Схема полета «человека-снаряда».

полной невесомости. Как известно, знаменитая собака Лайка — «пассажир» второго советского искусственного спутника Земли, — перенесла без вреда как кратковременную перегрузку во время разгона ракеты-носителя, так и невесомость в течение нескольких дней при орбитальном движении спутника.

Но вернемся к нашему цирковому артисту.

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 ствола 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 предыдущем разделе 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.

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/с^2, α = 70°. Что касается высоты подъема h, то, как видно из рис. 32, мы должны принять ее равной 25 – 6 = 19 м. Итак, искомая скорость

$$v = \frac{\sqrt{19{,}6 \cdot 19}}{0{,}94} \approx 20{,}6 \text{ м/с}.$$

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

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

Мы узнали, что ускорение, с каким движется тело артиста в стволе орудия, равно 35 м/с^2, т. е. приблизительно в $3^1/_2$ раза больше обычного ускорения силы тяжести. Поэтому артист будет в момент выстрела чувствовать себя в $4^1/_2$ раза тяжелее обычного: к нормальному его весу прибавился $3^1/_2$-кратный «искусственный вес»[1].

Сколько времени длится ощущение увеличенного веса? Из формулы

$$S = \frac{at^2}{2} = \frac{at \cdot t}{2} = \frac{vt}{2}$$

имеем:

$$6 = \frac{20{,}6 \cdot t}{2}, \text{ откуда } t = \frac{12}{20{,}6} \approx 0{,}6 \text{ с}.$$

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

Перейдем теперь ко *второй* фазе циркового номера — к свободному полету артиста в воздухе.

---

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

Здесь нас интересует продолжительность полета; сколько времени артист не ощущает никакого веса?

В предыдущей статье мы установили (см. главу четвертую), что продолжительность подобного полета равна

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

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

$$\frac{2\cdot 20{,}6\cdot \sin 70^\circ}{9{,}8}\approx 3{,}9\ \text{с}.$$

Ощущение 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/с. Измерено, что, упав на сетку, артист вдавливает ее на 1,5 м. Значит, скорость 20,6 м/с превращается в нуль на пути 1,5 м.

По формуле $v^2 = 2aS$, предполагая постоянной величину ускорения в замедленном движении обусловленной сеткой, имеем:

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

откуда ускорение a

$$a = \frac{20{,}6^2}{2 \cdot 1{,}5} \approx 141 \text{ м/с}^2.$$

Мы узнали, что, вдавливая сетку, артист движется с ускорением 141 м/с^2 — в 14 раз бóльшим, чем ускорение тяжести. В течение некоторого времени он чувствовал себя в 15 раз тяжелее нормального своего веса! Это необычайное состояние длилось, однако, всего

$$\frac{2 \cdot 1{,}5}{20{,}6} \approx \frac{1}{7} \text{ с}.$$

Даже привычный организм циркового артиста не мог бы безнаказанно перенести 15-кратное усиление тяжести, если бы это не длилось столь ничтожное время. Ведь человек весом 70 кг приобретает вес целой тонны! Длительное действие такой нагрузки должно было бы раздавить человека, во всяком случае лишить его возможности дышать, так как 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 больше, чем в Харькове. Сравнивать достижения в обоих пунктах, не учитывая различия в напряжении силы тяжести, неправильно: в Харькове физкультурник поставлен природой в более благоприятные условия, чем в Ленинграде.

Остановимся на теории. Тело, брошенное под углом α к горизонту со скоростью v, падает на расстоянии[1]

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

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

Архангельска (64°30')	982	см/с^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 дис-

[1] Для упрощения вычислений мы пренебрегаем сопротивлением воздуха.

танция обратно пропорциональна величине g. Несложный расчет показывает, что то усилие, которое человек затрачивает, чтобы забросить мяч в Харькове на 73 м 92 см, уносит тот же мяч в других местах на следующие расстояния:

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

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 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 железнодорожный мост в Скалистых горах грозил обрушиться из-за поврежденных ферм. Тем не менее бравый машинист решил вести по нему пассажирский поезд (рис. 34).

«— Но мост может обрушиться!

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

Рис. 34. Эпизод с мостом в романе Жюля Верна.

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 идти 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 · 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

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

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 только что описанным проделывают иногда конькобежцы: они рискуют быстро проскальзывать по тонкому льду, который наверное проломился бы под ними при медленном движении.

Следует также иметь в виду, что образное выражение «вес уничтожен скоростью» применимо и в случае движения по выпуклому мосту. В этом случае увеличение скорости приводит к уменьшению давления движущегося тела на мост.

Интересное явление наблюдал во время своего пребывания в Швеции генерал-майор А. А. Игнатьев. Вот что он пишет в своей книге «Пятьдесят лет в строю»:

«Лед, покрывающий море, благодаря своей гладкой поверхности и упругости представляет идеальный грунт для лошадей, подкованных на острые шипы, а с наступлением теплых дней верховые прогулки принимают все более спортивный характер: лед становится так тонок, что иначе как галопом по нему ехать опасно. Скачешь и слышишь за собой треск пробитого копытами тончайшего ледяного покрова, но он разрывается медленнее, чем движение коня».

• Три пути

ЗАДАЧА

На отвесной стене начерчен круг (рис. 35), 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 без трения 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, по-видимому, 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 различными скоростями: быстрее всех движется свободно падающая, а из двух скользящих по желобам быстрее та, путь которой наклонен круче. По более длинным путям дробинки, как мы видим, движутся быстрее, и можно доказать, что выигрыш от большой скорости как раз покрывает потерю от длинного пути.

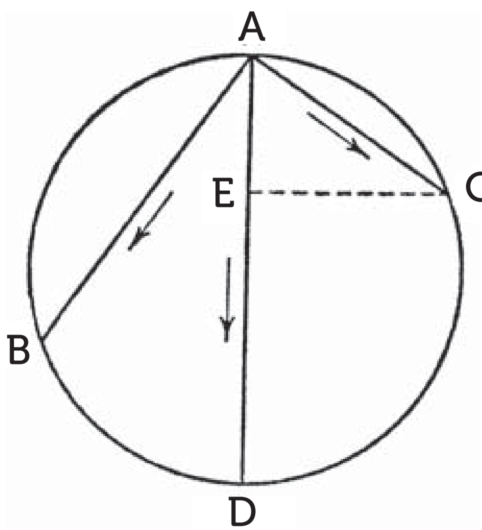


Рис. 35. Задача о трех дробинках.

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

$$AD = \frac{gt^2}{2}, \text{ откуда } t = \sqrt{\frac{2AD}{g}}.$$

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

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

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

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

Рис. 35 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 под действием силы тяжести по хордам AD, BD и CD круга, расположенного в вертикальной плоскости (рис. 36). 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.

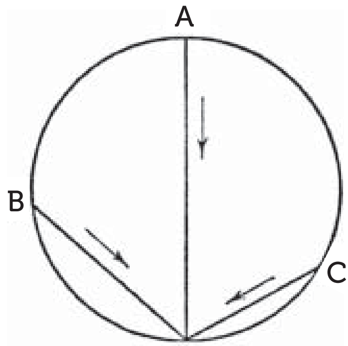


Рис. 36.
Задача Галилея.

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? Сопротивление 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 думать 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 м/с. Скорость падения здесь, как ни странно, никакого значения не имеет: ответ одинаков для любого небесного тела — для Земли, Луны, Юпитера...

- **Игра в мяч**

ЗАДАЧА

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

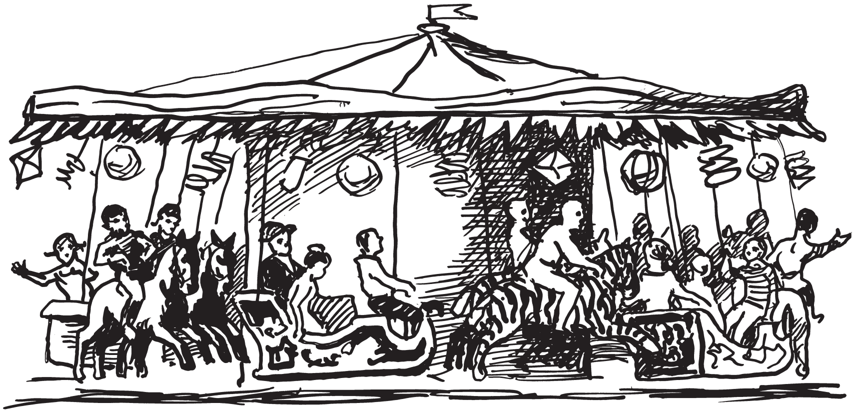
РЕШЕНИЕ

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

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

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

• Центростремительная сила

Следующий пример поможет нам выяснить некоторые соображения, которые будут необходимы в дальнейшем.

Привяжем шарик, лежащий на гладком столе, достаточно длинной нитью к гвоздю, вбитому посредине стола (рис. 37). Щелчком сообщим ему некоторую скорость v. Пока шарик не натянет нити, он будет по инерции лететь прямолинейно. Но как только нить натянется, шарик начнет с постоянной по величине скоростью описывать окружность, центр которой будет у основания гвоздя. Если затем нить пережечь (рис. 38), то шарик, двигаясь по инерции, улетит по касательной к окружности (точно так же, как по касательной к точильному камню летят искры, если к нему прикоснуться куском стали). Таким образом, сила натяжения нити выводит шарик из состояния прямолинейного равномерного движения по инерции. Согласно второму закону механики сила пропорциональна ускорению и направлена в ту же сторону, куда и ускорение. Поэтому сила натяжения нити сообщит шарику ускорение, которое будет направлено в сторону действия силы, т. е. по направлению к гвоздю, который расположен в центре окружности. Шарик по инерции стремится удалиться от центра, а сила натяжения нити устремляет его к центру, поэтому эту силу и называют центростремительной, а ускорение соответственно — центростремительным ускорением.

Если известны скорость v движения по окружности и радиус окружности R, то центростремительное ускорение a вычисляется по следующей формуле:

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

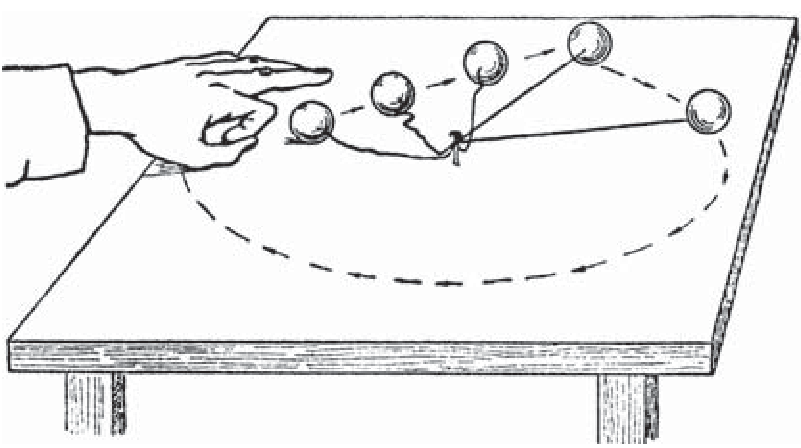


Рис. 37. Натянувшаяся нить заставляет шарик двигаться равномерно по окружности.

Согласно второму закону механики, центростремительная сила равна

$$F = m\frac{v^2}{R}.$$

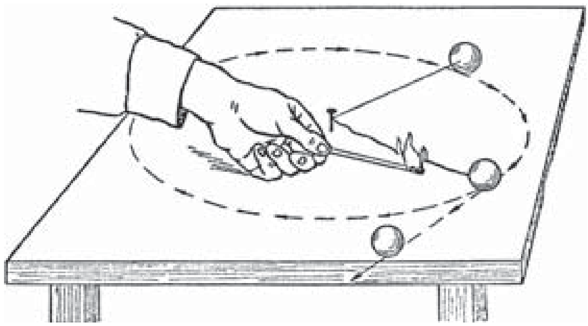


Рис. 38. После пережигания нити шарик улетает по касательной к окружности.

Покажем, как можно вывести формулу для центростремительного ускорения. Пусть шарик в некоторый момент находится в точке *A* (считаем, что шарик уже начал вращательное движение). Если бы нить пережгли, то шарик, в течение

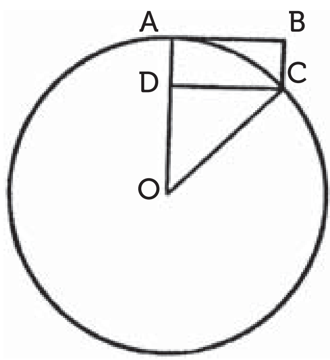


Рис. 39. К выводу формулы для центростремительного ускорения.

некоторого малого промежутка времени t двигаясь по инерции по касательной к окружности, очутился бы в точке *B* (рис. 39), пройдя путь $AB = vt$, но центростремительная сила, в данном случае сила натяжения нити, ускоряет шарик в перпендикулярном направлении и шарик оказывается в точке C, лежащей на окружности. Если из точки C опустить на OA перпендикуляр CD, то отрезок AD будет численно равен пути, который шарик прошел бы, двигаясь только под действием силы, равной центростремительной силе. Этот путь вычисляется по формуле равноускоренного движения без начальной скорости (см. таблицу в начале второй главы)

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

где a — центростремительное ускорение. По теореме Пифагора:

$$OC^2 = OD^2 + DC^2.$$

Далее,

$$CD = AB = vt,\ OD = OA - AD = R - \frac{at^2}{2},\ OC = R.$$

откуда

$$R^2 = \left(R - \frac{at^2}{2}\right)^2 + (vt)^2$$

или

$$R^2 = R^2 - Rat^2 + \frac{a^2t^4}{4} + v^2t^2.$$

Таким образом, $Ra = v^2 + \dfrac{a^2t^2}{4}$.

Мы рассматриваем движение шарика в течение очень маленького промежутка времени t (сколь угодно малого, стремящегося к нулю), поэтому член, содержащий t^2, т. е. $\dfrac{a^2t^2}{4}$, очень мал по сравнению с Ra и v^2, и им можно пренебречь. Отбрасывая эту малую величину, получим:

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

- **Первая космическая скорость**

Попробуем выяснить, почему искусственный спутник не падает на Землю. Ведь все тела, поднятые над Землей под действием силы притяжения Земли, падают обратно. Причина заключается в той огромной скорости, около 8 км/с, которая сообщена спутнику для вывода его на орбиту.

Получив такую скорость, тело уже не может упасть на Землю и превращается в ее искусственный спутник. Сила притяжения Земли лишь искривляет его путь, заставляя его описывать замкнутую эллиптическую траекторию вокруг нашей планеты.

В частном случае орбита спутника может представлять собой окружность, центром которой служит центр Земли. Выведем формулу для скорости движения спутника по такой орбите, т. е. для так называемой круговой скорости.

Спутник удерживается на круговой орбите центростремительной силой, роль которой играет сила притяжения Земли. Если обозначить массу спутника буквой m, скорость — буквой v, а радиус его орбиты — буквой R, то величина F центростремительной силы найдется, как мы уже знаем, по формуле

$$F = m\frac{v^2}{R}.$$

С другой стороны, согласно закону всемирного тяготения, та же сила равна

$$F = \gamma\frac{mM}{R^2},$$

где M — масса Земли, а γ — так называемая постоянная тяготения. Таким образом,

$$m\frac{v^2}{R} = \gamma\frac{mM}{R^2}.$$

Отсюда находится величина круговой скорости:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma M}{R}}.$$

Если высота орбиты спутника над поверхностью Земли равна H, а радиус Земли равен r (рис. 40), то

$$v = \sqrt{\frac{\gamma M}{r + H}}.$$

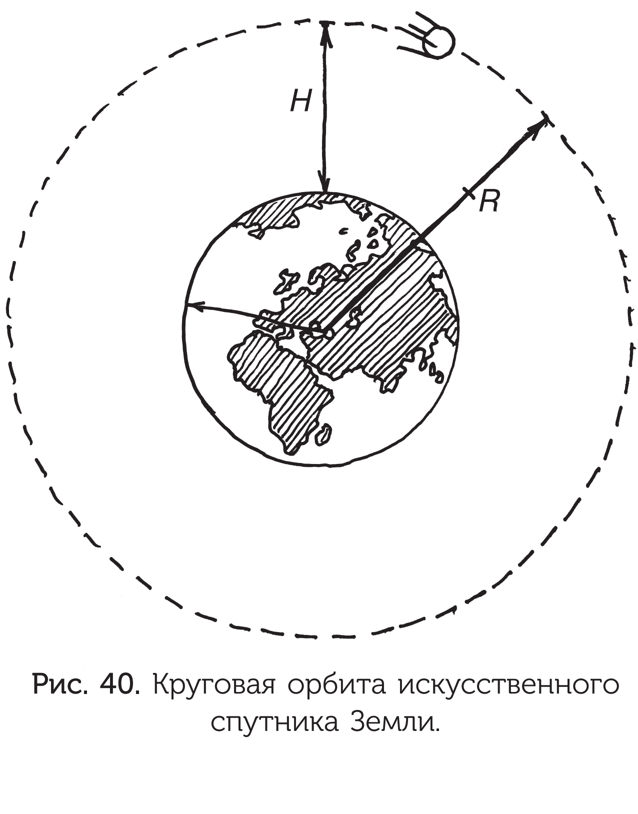


Рис. 40. Круговая орбита искусственного спутника Земли.

Для удобства вычислений полученную формулу можно преобразовать. Вспомним, что на поверхности Земли сила притяжения равна mg. По закону всемирного тяготения

$$mg = \gamma \frac{mM}{r^2},$$

откуда

$$\gamma\ M = gr^2.$$

Таким образом, мы получаем следующую формулу для круговой скорости на высоте H над земной поверхностью:

$$v = \sqrt{\frac{gr^2}{r + H}}$$

или

$$v = r\sqrt{\frac{g}{r + H}}.$$

Следует иметь в виду, что в этой формуле g есть ускорение силы тяготения *на поверхности* Земли.

Если высота H орбиты невелика по сравнению с радиусом Земли r, то можно приближенно считать $H \approx 0$, и тогда формула для круговой скорости упрощается:

$$v = r\sqrt{\frac{g}{r}} \text{ или } v = \sqrt{rg}.$$

Если в последнюю формулу мы подставим значения g = 9,81 м/с^2, r = 6378 км (экваториальный радиус Земли), то найдем так называемую первую космическую скорость

$$v = \sqrt{9{,}81 \cdot 10^{-3}\ \text{м/с}^2 \cdot 6378\ \text{км}} = 7{,}9\ \text{км/с}$$

Такую скорость должен иметь искусственный спутник Земли, обращающийся у самой земной поверхности. Фактически, конечно, вследствие неровностей земной поверхности и, главное, сопротивления атмосферы, спутник не может двигаться по подобной орбите. С увеличением же высоты круговой орбиты величина орбитальной скорости уменьшается.

• 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 здоровье: 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. 41) *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. 37. 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 ощущает-

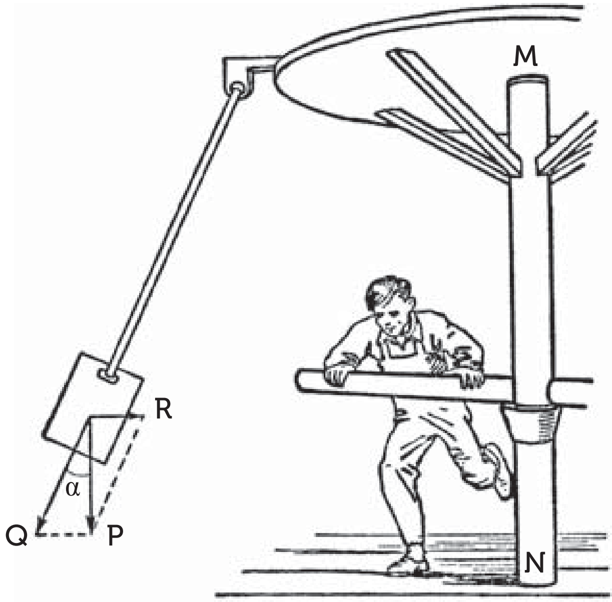


Рис. 41. Карусель. Показаны силы, действующие на возок.

ся 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

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

где v — скорость центра тяжести 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:

$$v = {}^1/_{15} \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 6 \approx 2{,}5 \text{ м/с}.$$

Теперь находим величину ускорения, порождаемого силой R:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{600} \approx 104 \text{ м/с}^2.$$

Так как силы пропорциональны ускорениям, то

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

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

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

Если человек при обычных условиях весил 60 кг, то сейчас он прибавится в весе примерно на 360 г.

Если на обыкновенной, сравнительно медленно вращающейся карусели кажущаяся прибавка веса мало ощутительна, то на быстроходных центробежных приборах малого радиуса она доводится в некоторых случаях до огромной величины. Существует прибор подобного рода — так называемая «ультрацентрифуга», вращающаяся часть которой делает 80000 оборотов в минуту. С помощью этого прибора достигается возрастание веса в четверть миллиона раз! Каждая мельчайшая капелька жидкости, исследуемой на этом приборе, при нормальном весе в 1 мг как бы превращается в тяжелое тело весом в четверть килограмма.

Большие центробежные машины в настоящее время используются для испытаний выносливости человека на большие перегрузки, что имеет важнейшее значение для осуществления будущих межпланетных экспедиций. Подбирая определенным образом радиус и скорость вращения, можно получить необходимое увеличение веса испытуемого. Как показывают эксперименты, человек, несомненно, в течение нескольких минут сможет без вреда перенести увеличение своего веса в четыре-пять раз, а это обеспечивает его безопасный вылет в космическое пространство.

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

• Небезопасный аттракцион

В одном из парков Москвы предполагалось устроить новый аттракцион. Проектировалось нечто вроде «гигантских шагов», но к концам канатов (или штанг) предполагалось прикрепить модели аэропланов. 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 почти горизонтально. Проект не был осуществлен, так как выяснилось, 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 во время пребывания на описанной карусели может переносить безвредно лишь трехкратное увеличение тяжести.

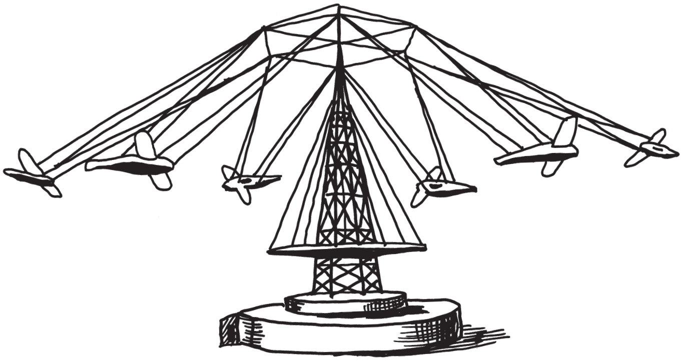


Рис. 42. Карусель с аэропланами.

Здесь нам пригодится рис. 41, 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 имело место равенство

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

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

следовательно,

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

откуда

$$\alpha \approx 71\ .$$

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. 42 изображает такого типа аттракцион. Вы видите, что наклон канатов далеко не достигает здесь предельного.

• На железнодорожном закруглении

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

Подобные явления наблюдаются иногда пассажирами поездов при большой скорости движения.

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].

Новое направление отвесной линии легко определяется из рис. 43. На нем буквой *P* обозначена сила тяжести, буквой *R* — сила центростреми-

---

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

тельная. 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

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

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

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

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

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{18^2}{600 \cdot 9,8} \approx 0,055,$$

откуда

$$\alpha \approx 3^\circ.$$

Это мнимо-отвесное[1] направление мы неизбежно будем считать за отвесное, действительно же отвесные предметы покажутся нам наклоненными на 3°. При поездке по 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 на закруглении возвышают

---

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

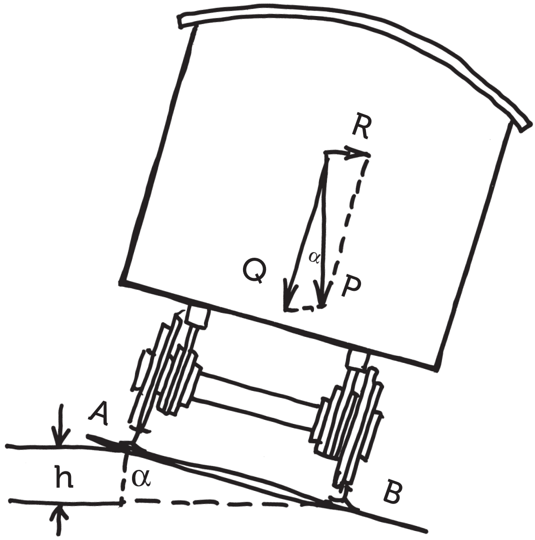


Рис. 43. Вагон идет по закруглению.
Какие на него действуют силы?
Внизу поперечный наклон полотна дороги.

над внутренним на величину, соответствующую новому направлению отвесной линии. Например, для сейчас рассмотренного закругления наружный рельс *A* (рис. 43) должен быть приподнят на величину *h*, удовлетворяющую уравнению

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

где *AB* есть ширина колеи, равная приблизительно 1,5 м; $\sin\alpha = \sin 3^\circ = 0{,}052$. Значит,

$$h = AB \sin\alpha = 1500 \cdot 0{,}052 \approx 80 \text{ мм}.$$

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 значительным. При скорости, например, 72 км/час (20 м/с) и радиусе 100 м угол наклона определяется из уравнения

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

откуда

$$\alpha \approx 22^\circ.$$

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, хотя также вполне согласные с законами механики. Велосипедист в цирке кружится в воронке («корзине»), радиус которой 5 и менее метров; при скорости 10 м/с наклон стенок воронки должен быть очень крут:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{10^2}{5 \cdot 9{,}8} \approx 2{,}04,$$

откуда $\alpha \approx 63^\circ$.

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

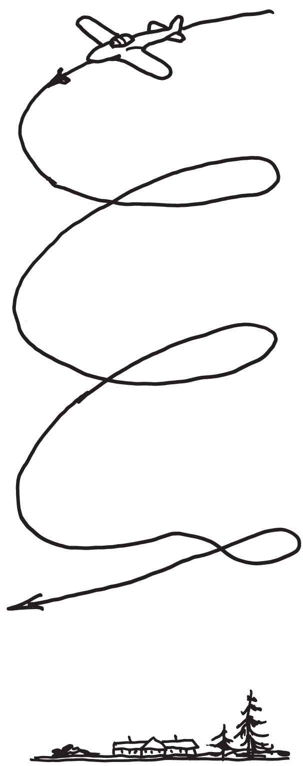


Рис. 44. Летчик описывает винтовую линию.

• Наклонная Земля

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 увеличенную 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 «увеличенная тяжесть».

Возьмем числовые данные из действительности: летчик со скоростью 216 км/час (60 м/с) описывает винтовую линию диаметром 140 м (рис. 44). Угол α наклона находим из уравнения

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{v^2}{r} : g = \frac{60^2}{70 \cdot 9{,}8} \approx 5{,}2,$$

откуда $\alpha \approx 79^\circ$. Теоретически земля должна для такого летчика стать не только «набекрень», но и почти «дыбом», отклоняясь всего на 11° от вертикали (рис. 45).

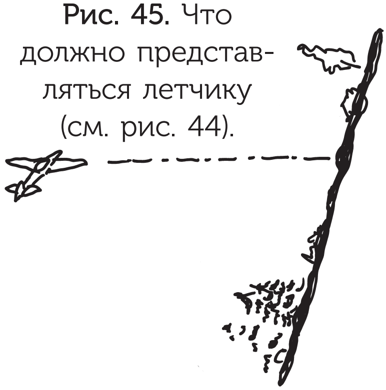


Рис. 45. Что должно представляться летчику (см. рис. 44).

На практике вследствие, вероятно, физиологических причин в подобных случаях земля кажется наклоненной на угол, несколько меньший найденного выше.

Что касается «увеличенной тяжести», то отношение ее к естественной равно (рис. 43) 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 раз в 5 сильнее, чем на прямом пути, т. е. чувствует себя примерно в пять раз тяжелее.

На рис. 46 и 47 приведен еще один случай кажущегося летчику отклонения земной поверхности от горизонтального положения.

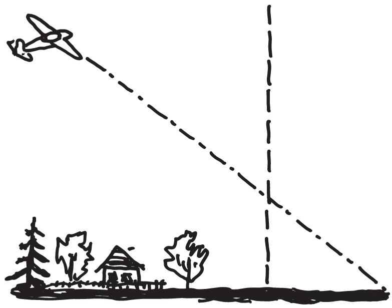


Рис. 46. Летчик летит по кривой большого радиуса (520 м) со скоростью 190 км/час.

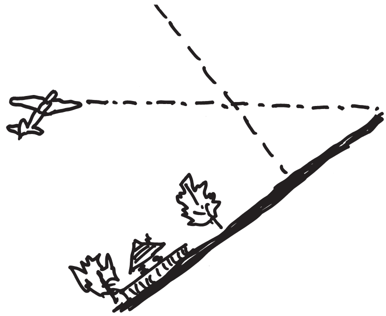


Рис. 47. Что представляется летчику (см. рис. 46).

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. Расчет показывает, что тело его стало тяжелее в 8 раз! Лишь 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. Что будет дальше? Выровнит ли река свое течение сама? Нет, искривление будет расти. В месте искривления (рис. 48) 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

Рис. 48. Малейший изгиб ручья неудержимо растет.

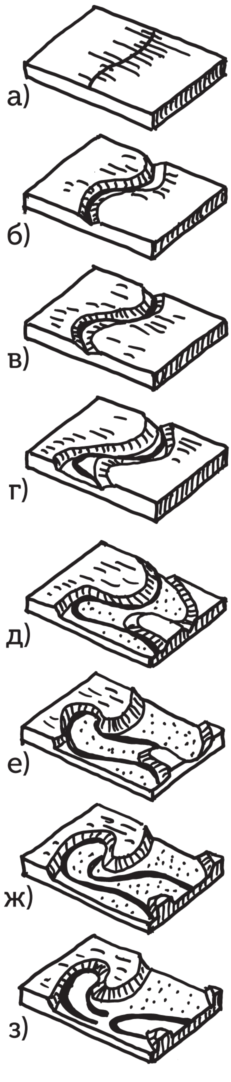


Рис. 49. Как постепенно увеличивается само собой искривление речного ложа.

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.

Так как течение у вогнутого берега быстрее, чем у выпуклого, то частицы грунта, которые несет с собой вода, осаждаются у выпуклого берега, а у вогнутого, наоборот, идет усиленное размывание, в результате которого река у этого берега становится глубже.

По этой причине выпуклый берег становится пологим и 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.

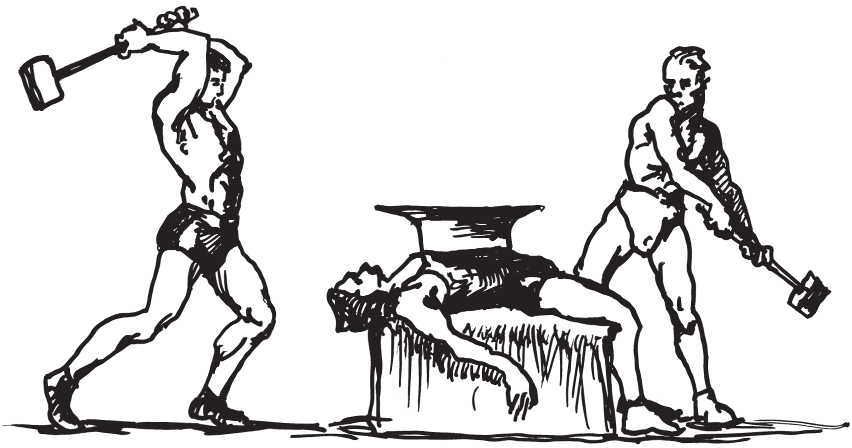
Интересно проследить за дальнейшей судьбой речных извивов. Последовательные изменения вида речного русла упрощенно показаны на рис. 49, *а—з*. На рис. 49, *а* перед вами чуть изогнутая речка, на следующем — 49, *б* — течение успело уже подточить вогнутый берег и несколько отступило от покатого выпуклого. На рис. 49, *в* русло реки еще больше расширилось, а на рис. 49, *г* превратилось уже в широкую долину, в которой ложе реки занимает только некоторую часть. На рис. 49, *д*, *е* и *ж* развитие речной долины пошло еще дальше; на рис. 49, *ж* изгиб речного ложа так велик, что образует почти петлю. Наконец, на рис. 49, *з* 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 «староречье» — стоячую воду в покинутой части русла.

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

---

[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», гл. I.

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.



Глава шестая
УДАР

• Почему важно изучать явление удара

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. Было время, когда ударом двух тел стремились объяснить все прочие явления природы.

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: очень многие явления — электрические, оптические, тяготение — не поддаются 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 и в технике. Все составные части машин и сооружений, которые подвергаются действию удара, рассчитывают на прочность так, чтобы они могли противостоять ударным нагрузкам. 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:

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

Точно так же, когда неупругое тело, обладающее массой 3 кг и скоростью 8 см/с, сталкивается с другим неупругим телом массы 2 кг, настигающим его со скоростью 10 см/с, то окончательная скорость у каждого тела:

$$u = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ см/с}.$$

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

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

Если направление скорости v_1 мы считаем положительным, то знак плюс перед скоростью и 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 выкладкам. 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

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

Потеря скорости для первого тела равна была бы $v_1 - u$; выигрыш скорости для второго $u - v_2$. В случае же тел упругих потеря и выигрыш, мы знаем, удваиваются, т. е. равны $2(v_1 - u)$ и $2(u - v_2)$. Значит, окончательные скорости u_1 и u_2 после упругого удара сейчас было изложено.

$$u_1 = v_1 - 2\,(v_1 - u) = 2u - v_1,$$
$$u_2 = v_2 + 2\,(u - v_2) = 2u - v_2,$$

Остается только подставить в эти выражения вместо u 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

$$u_2 - u_1.$$

Подставив вместо u_2 и u_1 их выражения, получаем:

$$u_2 - u_1 = 2u - v_2 - (2u - v_1) = v_1 - v_2.$$

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 ($u_2 - u_1 = v_1 - v_2$). 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 бильярдные), сталкиваясь со скоростью 1 м/с, сдавливаются с силой 1500 кг, а при скорости 2 м/с — с силой 3500 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 т 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/с, время удара должно равняться 40 часам. Круг соприкосновения имеет при этом радиус 12,5 км, а сила взаимного давления — около 400 миллионов тонн!

• Изучите свой мяч

Те формулы удара тел, с которыми мы познакомились на предыдущих страницах, непосредственно на практике мало применимы. Число тех, которые с достаточным для целей практики приближением можно причислить к «вполне неупругим» или к «вполне упругим», весьма ограниченно. Преобладающее большинство тел не может быть отнесено 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 был бы подскочить на ту же высоту. Неупругое тело не подскакивает совсем (это ясно из физических соображений).

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 u, а потеря скорости $v_1 - u$. 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 $v_1 - u$, а следовательно, в общем скорость вполне упругого мяча должна уменьшиться на $2(v_1 - u)$ и равняться

$$v_1 - 2(v_1 - u) = 2u - v_1.$$

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 $v_1 - u$, а составляет некоторую долю ее, которую обозначим правильной дробью e («коэффициент восстановления»). Итак, потеря скорости при упругом ударе в первом периоде равна $v_1 - u$, во втором равна $e(v_1 - u)$. Общая потеря равна $(1 + e)(v_1 - u)$, а скорость u_1, остающаяся после удара, равна

$$u_1 = v_1 - (1 + e)(v_1 - u) = (1 + e)u - ev_1.$$

Скорость же u_2 ударяемого тела (в данном случае площадки), которое отталкивается мячом по закону противодействия, должна равняться, как легко вычислить,

$$u_2 = (1 + e)u - ev_2.$$

Разность $u_2 - u_1$ обеих скоростей равна $ev_1 - ev_2 = e(v_1 - v_2)$, откуда находим, что «коэффициент восстановления»

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2}.$$

Для мяча, ударяющегося о неподвижную площадку, скорости равны $u_2 = (1 + e)u - ev_2 = 0$, $v_2 = 0$. Следовательно,

$$e = \frac{u_1}{v_1}.$$

Но u_1 есть скорость подскакивающего шара, равная $\sqrt{2gh}$, 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 «коэффициент восстановления» e мяча, характеризующий степень отступления его свойств от вполне упругих: надо измерить высоту, с которой его роняют,

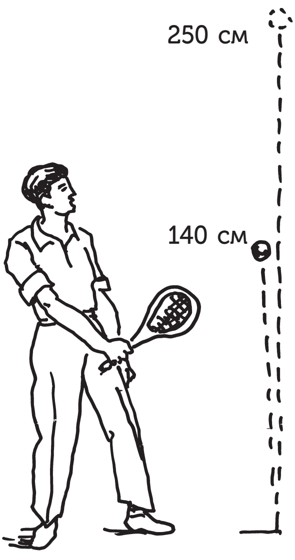


Рис. 50. Хороший мяч для тенниса должен подпрыгнуть примерно на 140 см, если его уронить с высоты 250 см.

и высоту, на которую он подскакивает; квадратный корень из отношения этих величин дает искомый коэффициент.

По спортивным правилам хороший теннисный мяч должен при падении с высоты 250 см подскакивать на высоту 127—152 см (рис. 50). Значит, коэффициент 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 $h \approx 140$ 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 $h_1 \approx 79$ см.

Высоту h_2 третьего подъема мяча найдем из уравнения

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{79}},$$

откуда $h_2 \approx 44$ 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. (рис. 51), если не принимать в расчет сопротивление воздуха, которое в этом случае должно быть велико (из-за значительной скорости).

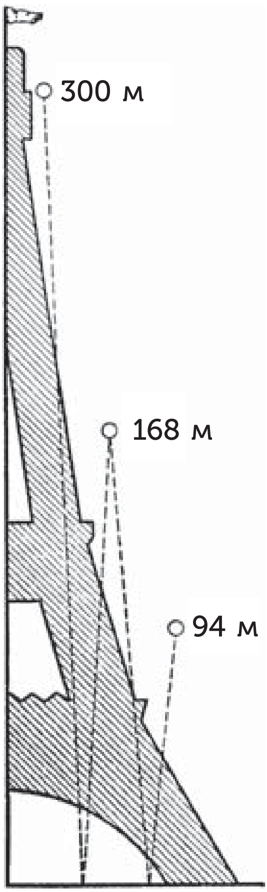


Рис. 51. Как высоко подпрыгнул бы мяч, уроненный с Эйфелевой башни.

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

Мы знаем, что

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

Следовательно,

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

Продолжительность подскакивания равна

$$T + 2t + 2t_1 + 2t_2 + \cdots,$$

т. е.

$$\sqrt{\frac{2H}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h}{g}} + 2\sqrt{\frac{2h_1}{g}} + \cdots$$

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 = 2,5 м, g = 9,8 м/с^2, e = 0,75, имеем общую продолжительность подскакивания равной 5 с: мяч будет подскакивать в течение 5 с.

Если бы его уронить с высоты Эйфелевой башни, подскакивание длилось бы (при отсутствии сопротивления атмосферы) около минуты, точнее — 54 с, 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, коэффициент 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». Это такой удар, который происходит в направлении диаметра шара, проходящего через точку приложения ударной силы.

Что произойдет с обоими шарами после удара?

Оба крокетных шара имеют равную массу. Если бы они были *вполне неупруги*, то скорости их после удара были бы одинаковыми; они равнялись бы половине скорости ударяющего шара. Это вытекает из формулы

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

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 приблизительно и происходит при ударе бильярдных шаров (из слоновой кости), которые обладают большим коэффициентом восстановления (для слоновой кости $e = \frac{8}{9}$).

Но крокетные шары имеют значительно меньший коэффициент восстановления ($e = 0,5$). 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 «коэффициент восстановления» (как его определить, читателю известно из предыдущего) равен e. В предыдущей статье мы нашли для скоростей u_1 и u_2 обоих шаров после удара следующие выражения:

$$u_1 = (1 + e)u - ev_1;\ u_2 = (1 + e)u - ev_2.$$

Здесь, как и в прежних формулах,

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

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

$$u = \frac{v_1}{2};\ \ u_1 = \frac{v_1}{2}(1 - e);\ \ u_2 = \frac{v_1}{2}(1 + e).$$

Кроме того, легко убедиться, что

$$u_1 + u_2 = v_1;\ u_2 - u_1 = ev_1.$$

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 $e = 0{,}5$. В таком случае шар, покоившийся до удара, получит $^3/_4$ первоначальной скорости крокировавшего шара, а этот последний будет двигаться за ним, сохранив только $^1/_4$ 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:

$$u_1 = (1 + e)u - ev_1; \;\; (1 + e)u - ev_2,$$

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

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

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

Но отношение $\frac{m_2}{m_1}$ массы телеги к массе поезда ничтожно; приравнивая его нулю, имеем $u \approx v_1$. 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, $u_2 = (1+e)u = (1+e)v_1$, превышает скорость поезда на ev_1. Чем больше была скорость v_1 поезда до удара, тем больше внезапно полученная телегой скорость, тем больше сила удара, которая разрушает телегу. Это в данном случае имеет существенное значение; для избежания катастрофы необходимо преодолеть *трение* 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. Как может живой человек выдерживать без вреда для себя такое сотрясение?

Законы удара 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

$$u_2 = 2u - v_2 = \frac{2(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2} - v_2.$$

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:

$$u_2 = \frac{2m_1 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{2v_1 \frac{m_1}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$$

(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

$$u_2 = 2v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2},$$

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

[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.

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

$$u_2 = 2v_1 \cdot \frac{1}{100} = \frac{1}{50} v_1.$$

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

• Об измерении 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, около 11 км. Чтобы измерить подобную глубину, нужно спустить в океан 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 сантиметрах). Объем такой проволоки равен $^1/_4\ \pi D^2 \cdot$ $\cdot\ 1100000$ см^3. А так как 1 см^3 меди весит в воде круглым счетом 8 г, то наша проволока должна представлять собой в воде груз

$$\frac{1}{4}\pi D^2 \cdot 1100000 \cdot 8 = 6900000D^2 \text{ г.}$$

При толщине проволоки, например, 3 мм (D = = 0,3 см) это составит 620000 г, т. е. 620 кг. Удержит ли такой толщины проволока груз более $^3/_5$ *т*? Здесь мы должны немного отойти в сторону и посвятить страницу вопросу о силах, разрывающих проволоки и стержни.

Отрасль механики, называемая «сопротивлением материалов», устанавливает, что сила, необходимая для разрыва стержня или проволоки, зависит от их материала, от величины поперечного сечения и от способа приложения силы. Зависимость от сечения проста: во сколько раз увеличивается площадь поперечного 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. 52. 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.

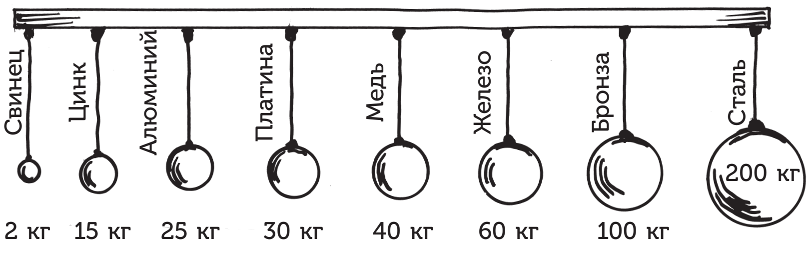


Рис. 52. Какими грузами разрываются проволоки из разных металлов? (сечение равно 1 мм^2).

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 $^1/_4\pi D^2$ 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 $= 3140D^2$ кг.

Сама же проволока весит, как мы уже вычислили, $6900D^2$ кг — в $2^1/_2$ 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^2 вещества ρ г, то вся проволока весит 100 000 $sL\rho$ г; выдержать же нагрузку она может в $1000Q \times 100s = 100\,000Qs$ 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 воде*; вне воды она еще меньше и равна $\frac{Q}{\rho} = \frac{40}{9} \approx 4{,}4$ км.

А вот предельная длина для проволок из некоторых других материалов:

для свинца	200 м
для цинка	2,1 км

для железа	7,5 км
для стали	25 км

Но практически нельзя пользоваться отвесами такой длины; это значило бы подвергать их недопустимым нагрузкам. Необходимо нагружать их лишь до некоторой части разрывающей нагрузки: для железа и стали, например, до $^1/_4$. Значит, практически можно пользоваться железным отвесом не длиннее 2 км, а стальным — не длиннее $6^1/_4$ км.

В случае погружения отвесов в воду крайняя длина их — для железа и стали — может быть увеличена на $^1/_8$ 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, особенно хорошо выдерживающих растяжение, принадлежит хромоникелевая сталь: чтобы разорвать проволоку из такой стали в 1 мм^2 сечением, надо приложить силу в 250 кг.

---

[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, гл. X.

Вы лучше поймете, что это значит, если взглянете на прилагаемый рис. 53; тонкая стальная проволока (ее диаметр чуть больше 1 мм) удерживает тяжелого борова. Из такой стали и изготовляется лот-линь океанского глубомера. Так как 1 мм^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 длина отвеса из этой стали равна $L = \frac{62}{7} = 8{,}8$ км.

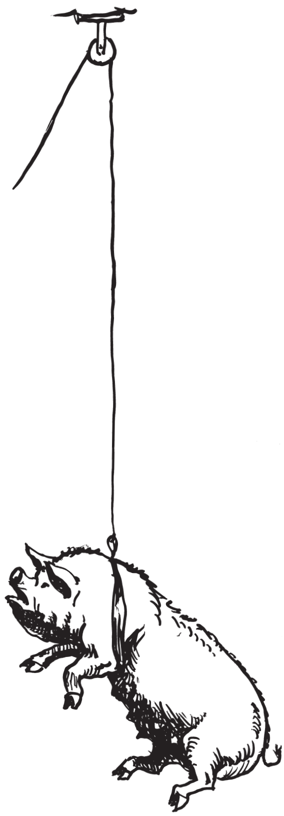


Рис. 53. Проволока из хромоникелевой стали выдерживает нагрузку 250 кг на мм^2.

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» воздушного океана, при помощи змеев с самопишущими приборами, например, в том случае, если запускают змея на 9 км и больше, 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 паутинкой. 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

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

т. е. $\frac{1}{500}$ мм^2. Значит, груз в 100 г приходится на площадь в $\frac{1}{500}$ мм^2; на целый мм^2 придется 50000 г, или 50 кг. Бросив взгляд на нарисованную табличку прочности (рис. 52), вы убедитесь, что человеческий волос по крепости должен быть поставлен между медью и железом...

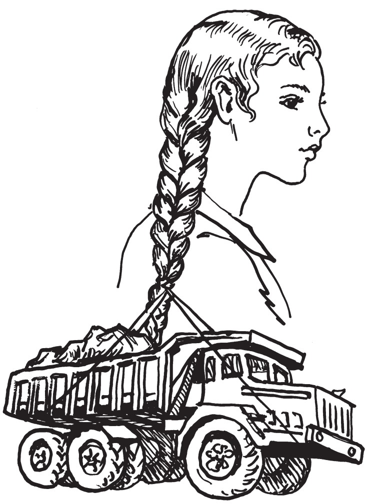


Рис. 54. Какой груз может выдержать женская коса?

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. 54, изображающий двадцатитонный самосвал, который удерживает женская коса: легко подсчитать, что коса из 200 000 волос может удержать груз в 20 т.

• Почему велосипедная рама делается из трубок

Какое преимущество в отношении прочности имеет трубка перед сплошным стержнем, если кольцевое сечение трубки равно по площади сечению стержня? Никакого, пока речь идет о сопротивлении *разрыву* или *сжатию*: трубка и стержень разрываются и раздробляются одинаковой силой. Но в случае сопротивления изгибающим 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 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».

Мы поймем причину этого, если рассмотрим поближе те напряжения, какие возникают в брусе при сгибании. Пусть в середине стержня *AB* (рис. 55), подпертого на концах, действует груз *Q*. Под влиянием груза стержень прогибается вниз. Что при этом происходит? Верхние слои бруса сжимаются, 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 сопротивление 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.

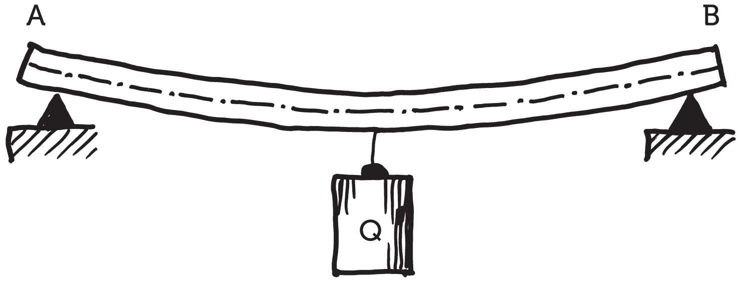


Рис. 55. Прогиб бруса.

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.

Поэтому целесообразно сечению балки придать такую форму, при которой большая часть материала находится возможно дальше от нейтрального слоя. Такое распределение материала осуществлено, например, в двутавровой и коробчатой балках, изображенных на рис. 56.

Впрочем, стенка балки не должна быть слишком тонкой: она не должна позволить полкам балок сдвинуться одна относительно другой и обязана обеспечить устойчивость балки.

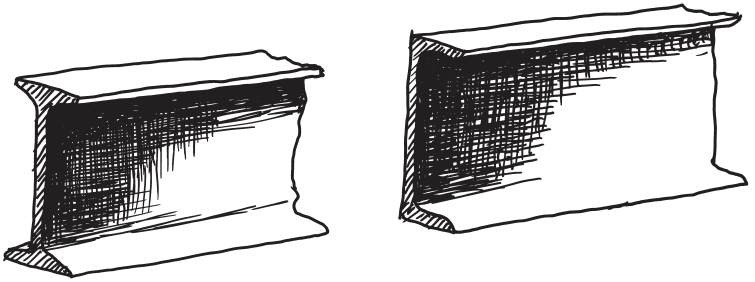


Рис. 56. Двутавровая (слева) и коробчатая балки.

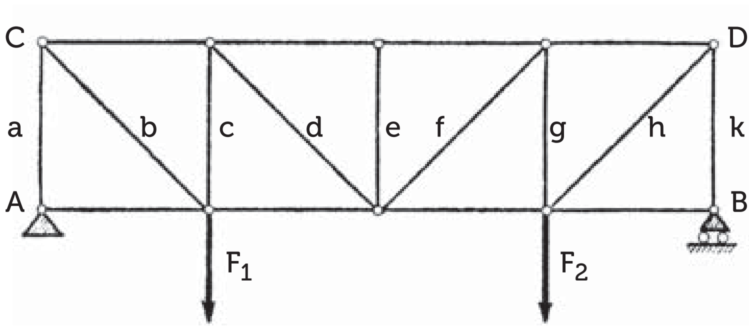


Рис. 57. Ферма заменяет в смысле прочности массивную балку.

Еще более совершенной формой в смысле экономии материала, чем двутавровая балка, является ферма. В ферме (рис. 57) вообще выброшен весь материал, прилежащий к нейтральному слою и потому слабо нагруженный. Взамен этого сплошного материала применены стержни *a*, *b*, ..., *k*, которые связывают пояса *AB* и *CD* фермы. Читателю ясно из предыдущего, что под действием нагрузок F_1 и F_2 верхний пояс фермы будет сжат, а нижний — растянут.

Теперь читателю понятно также и преимущество трубок перед сплошным стержнем. Добавлю числовой пример. Пусть имеются две круглые 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.

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

• 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.

Интересно рассмотреть притчу с точки зрения механики, именно — с точки зрения учения о прочности.

Величина *изгиба* стержня измеряется в механике так называемой «стрелой прогиба» x (рис. 58). Чем стрела прогиба в данном брусе больше, тем ближе момент излома. Величина же стрелы прогиба выражается следующей формулой:

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

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

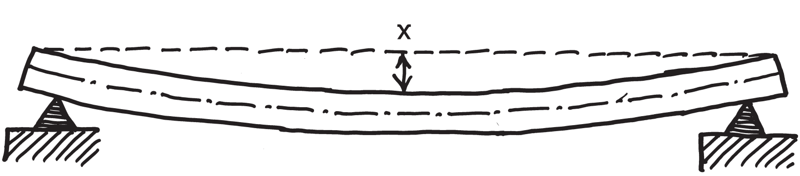


Рис. 58. Стрела прогиба **x**.

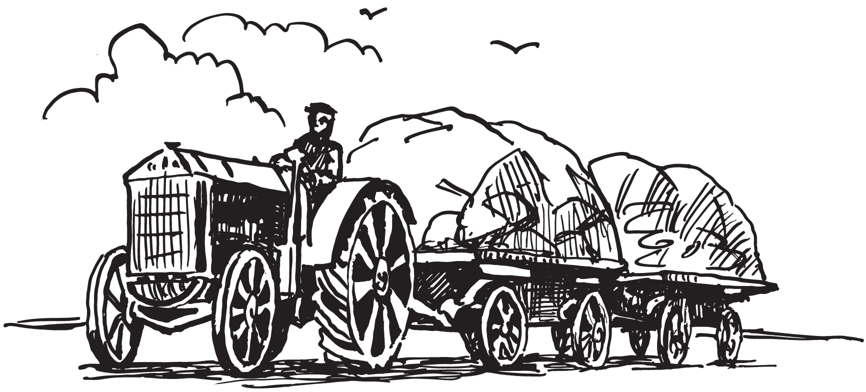
Применим формулу к пучку прутьев. Семь его прутьев располагались, вероятнее всего, так, как показано на концовке этой главы, где изображено сечение пучка. Рассматривать подобный пучок как сплошной стержень (для чего он должен быть крепко перевязан) можно только с приближением. Но мы здесь и не ищем строго 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 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

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

откуда

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

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



Глава восьмая
РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

• Чего многие не знают о 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/с, т. е. 60 000 см/с, то при массе ядра 1 кг (1000 г) кинетическая его энергия составляет:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1000 \cdot 60\,000^2}{2} = 18 \cdot 10^{11} \text{ эргов} = 1{,}8 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Это приблизительно равно 18 000 кгм. Вот какая значительная часть работы осталась неучтенной только из-за неточности определения килограммометра!

Теперь становится очевидным, как надо это определение пополнить:

килограммометр есть работа поднятия на земной поверхности первоначально неподвижного груза в 1 кг на высоту 1 м при условии, что в конце поднятия скорость груза равна нулю.

• 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 кгм, а *больше*.

Как же поступить, чтобы поднятием килограммовой гири на 1 м выполнить *ровно* килограммометр работы?

Поднимать гирю можно таким образом.

В начале поднятия надо давить на гирю снизу с силой больше 1 кг. Сообщив этим гире некоторую скорость по направлению вверх, следует уменьшить или вовсе прекратить давление руки и предоставить гире двигаться замедленно.

При этом момент, когда рука прекращает давление на гирю, нужно выбрать так, чтобы, двигаясь далее замедленно, гиря закончила свой путь в 1 м в тот момент, когда скорость ее сделается равной нулю.

Действуя таким образом, т. е. прилагая к гире не постоянную силу в 1 кг, а переменную, меняющуюся от величины, большей 1 кг, до величины, меньшей 1 кг, мы можем совершить работу ровно в 1 кгм.

• Как 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 может привести к чудовищным ошибкам.

Чтобы сравнивать между собой двигатели по их работоспособности, нужно сравнивать работы, произведенные ими за одно и то же время. Удоб-

---

[1] Кто-либо из читателей, быть может, возразит, что ведь и в таком случае тело может обладать в конечной точке пути некоторой скоростью, которую надо учесть. Отсюда как будто следует, что сила в 1 кг совершает на пути 1 м работу, *бóльшую* 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.

нее всего за единицу времени принять одну секунду. Таким образом, в механике вводится особая мера работоспособности, называемая мощностью. Под мощностью понимают работу, произведенную двигателем в одну секунду. В технике единицами мощности являются ватт и иногда еще применяется лошадиная сила, равная 735,499 Вт.

Решим для примера следующую задачу.

Автомобиль весом 850 кг движется со скоростью 72 километра в час по прямой горизонтальной дороге. Определить его мощность, если сопротивление движению составляет 20% его веса.

Определим сначала силу, движущую автомобиль. При равномерном движении она в точности равна сопротивлению, т. е.

$$850 \cdot 0{,}2 = 170 \text{ кг.}$$

Определим теперь путь, проходимый автомобилем в течение одной секунды. Он равен

$$\frac{72 \cdot 1000}{3600} = 20 \text{ м/с.}$$

Так как направление движущей силы совпадает с направлением движения, то, умножив величину движущей силы на путь, проходимый в секунду, получим работу, производимую автомобилем за секунду, т. е. мощность:

$$170 \text{ кг} \cdot 20 \text{ м/с} = 3400 \text{ кгм/с} \approx 34\,000 \text{ Вт.}$$

В лошадиных силах это будет составлять приблизительно

$$34000 : 735 \approx 46 \text{ л. с.}$$

- **Тяга трактора**

ЗАДАЧА

Мощность трактора «на крюке» — 10 л. с. Вычислить силу его тяги при каждой из скоростей, если

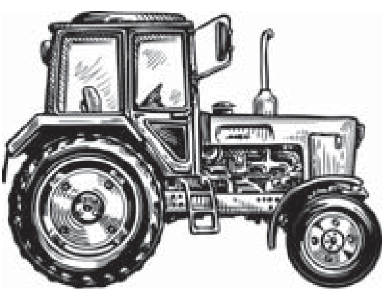
первая скорость	2,45 км/час	
вторая »	5,52	»
третья »	11,32	»

РЕШЕНИЕ

Так как мощность (в Вт) равна секундной работе, т. е. в данном случае произведению силы тяги (в *Н*) на секундное перемещение (в м), то составляем для «первой» скорости уравнение

$$735 \cdot 10 = x \cdot \frac{2{,}45 \cdot 1000}{3600},$$

где x — сила тяги трактора. Решив уравнение, узнаем, что $x \approx 10\,000$ *Н*.



Таким же образом находим, что тяга при «второй» скорости равна 5400 *Н*, при «третьей» 2200 *Н*.

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

- **Живые и механические двигатели**

Может ли человек проявить мощность в целую лошадиную силу? Другими словами, может ли он выполнить в секунду 735 Дж работы?

Рис. 59. Когда человек развивает мощность в одну лошадиную силу.

Считается, — и вполне правильно, — что мощность человека при нормальных условиях работы составляет около десятой доли лошадиной силы, т. е. равна 70—89 Вт. Однако в исключительных условиях человек на *короткое время* проявляет значительно бóльшую мощность. Взбегая поспешно по лестнице (рис. 59), мы совершаем работу больше 80 Дж/с. Если мы ежесекундно поднимаем свое тело на 6 ступеней, то при весе 70 кг и высоте одной ступени 17 см мы производим работу

$$70 \cdot 6 \cdot 0{,}17 \cdot 9{,}8 \approx 700 \text{ Дж},$$

т. е. почти в 1 л. с. и, значит, превосходим лошадь по мощности раза в $1^1/_2$. Но, конечно, так напряженно работать мы можем всего несколько минут, а затем должны отдыхать. Если учесть эти промежутки бездействия, то в среднем мощность наша не будет превосходить 0,1 л. с.

Несколько лет назад во время состязаний в беге на короткой дистанции (90 м) отмечен случай, когда бегун развил мощность в 5500 Дж/с, т. е. в 7,4 л. с.

Лошадь также может доводить свою мощность до десятикратной и большей величины. Совершая, например, в 1 секунду прыжок на высоту 1 м, лошадь весом 500 кг выполняет работу в 5000 Дж (рис. 60), а это отвечает мощности

$$5000 : 735 = 6,8 \text{ л. с.}$$

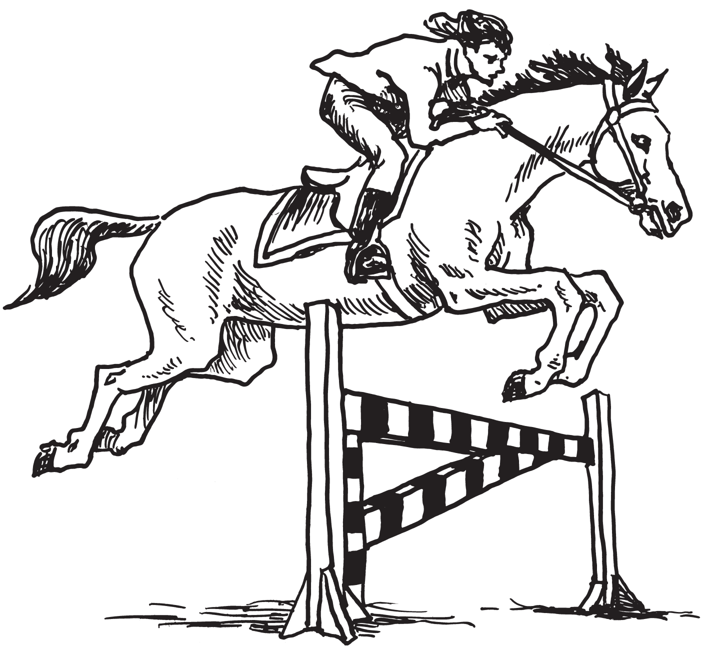


Рис. 60. Когда лошадь развивает мощность в 7 лошадиных сил.

Напомним, что мощность в одну лошадиную силу в полтора раза больше средней мощности лошади, так что в рассмотренном случае мы имеем более чем 10-кратное возрастание мощности.

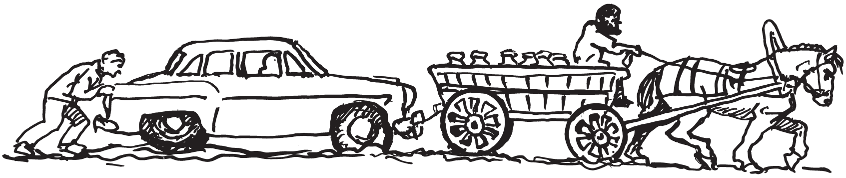


Рис. 61. Когда живой двигатель имеет преимущество перед машиной.

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 л. с. безусловно предпочтительнее повозки, запряженной двумя лошадьми. Но на песчаной дороге такой автомобиль будет беспомощно увязать, между тем как пара лошадей, способных при нужде развивать мощность в 15 и более лошадиных сил, благополучно справляется с препятствиями пути (рис. 61). «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 $3^1/_2$-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 л. с. практически нельзя заменить тягой 15 рабочих лошадей.

Никакое вообще число лошадей не может заменить одного трактора, даже сравнительно малосильного.

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

• Машинные рабы человечества

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 одном двигателе — задача, разрешенная лишь техникой нового времени.

Сто лет назад самой мощной машиной был паровой двигатель в 20 лошадиных сил, весивший 2 тонны. На одну лошадиную силу приходилось 100 кг веса машины. Отождествим для простоты мощность в одну лошадиную силу с мощностью одной лошади. Тогда будем иметь в лошади одну лошадиную силу на 500 кг веса (средний вес лошади), в механическом же двигателе — одну лошадиную силу на 100 кг веса. Паровая машина словно соединила мощность пяти лошадей в одном организме.

Лучшее соотношение мощности и веса мы имеем в современном 2000-сильном паровозе, весящем 100 т. А в электровозе мощностью 4500 л. с., при весе 120 т, мы имеем уже одну лошадиную силу на 27 кг веса.

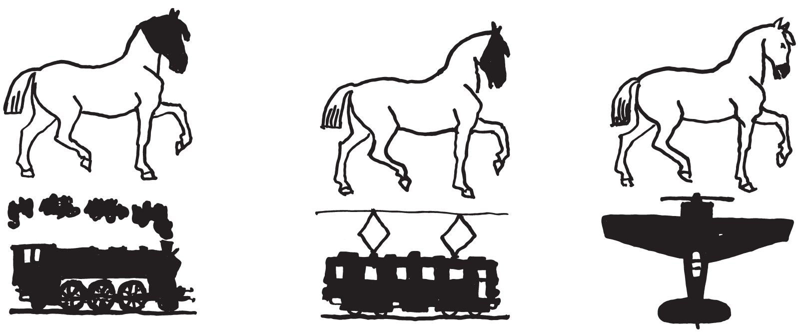


Рис. 62. Зачерненная часть контура лошади наглядно показывает, на какую долю веса приходится одна лошадиная сила в разных механических двигателях.

Огромный прогресс в этом отношении представляют авиационные двигатели. Двигатель в 550 л. с. весит всего 500 кг: здесь одна лошадиная сила приходится круглым счетом на 1 кг веса[1]. На рис. 62 эти соотношения представлены наглядным образом: зачерненная часть контура лошади показывает, на какой вес приходится одна лоша-

[1] В некоторых современных авиамоторах вес спускается до $^1/_2$ кг на одну лошадиную силу и даже еще ниже.

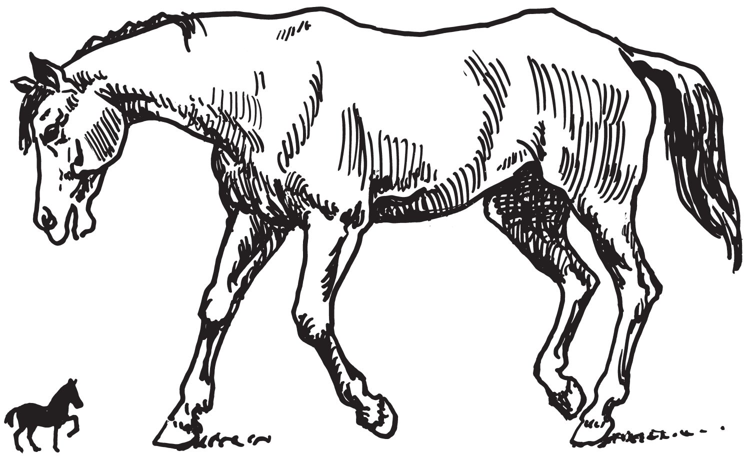


Рис. 63. Соотношение веса авиамотора и лошади при равных мощностях.

диная сила в соответствующем механическом двигателе.

Еще красноречивее рис. 63: здесь маленькая и большая лошади изображают, какой ничтожный вес стальных мускулов соперничает с огромной массой мышц животных.

Наконец, рис. 64 дает наглядное представление об относительной мощности небольшого авиационного двигателя: 162 лошадиных силы при объеме цилиндра всего 2 л.

Последнее слово в этом состязании еще не сказано современной техникой[1]. Мы не извлекаем из топлива всей той энергии, которая в нем содер-

[1] В данный момент первенство должно быть признано за ракетным двигателем, который, правда, в течение небольшого промежутка времени, может развить мощность в сотни тысяч и даже миллионы лошадиных сил.

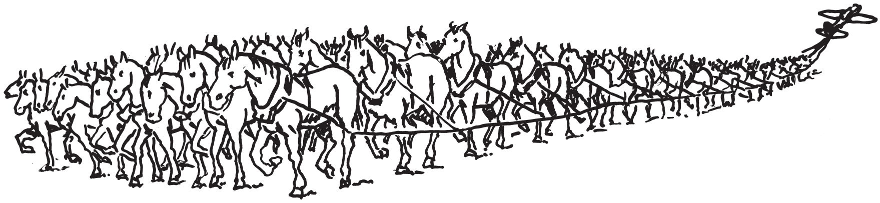


Рис. 64. Авиамотор с цилиндром емкостью 2 литра обладает мощностью в 162 лошадиные силы.

жится. Уясним себе, какой запас работы скрывает в себе одна калория теплоты, — количество, затрачиваемое для нагревания литра воды на 1°. Превращенная в механическую энергию полностью — на 100% — она доставила бы нам 4186 Дж работы, т. е. могла бы, например, поднять груз в 427 кг на высоту одного метра (рис. 65). Полезное же действие современных тепловых двигателей исчисляется только 10—30%: из каждой калории, получающейся в топке, они извлекают около тысячи джоулей вместо теоретических 4186.

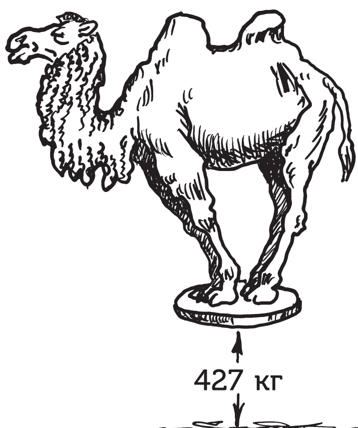


Рис. 65. Калория, превращенная в механическую работу, может поднять 427 кг на 1 м.

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

Современное ружье при весе около 4 кг (из которых на действующие части оружия приходится примерно лишь половина) развивает при выстреле 4000 Дж работы. Это кажется не особенно значительным, но не забудем, что пуля находится под действием пороховых газов только тот ничтожный промежуток времени, пока она скользит по каналу ружья, т. е. примерно 800-ю долю секунды. Так как мощность двигателей измеряется количеством работы, выполняемой в 1 с, то, отнеся работу пороховых газов к полной секунде, получим для мощности ружейного выстрела огромное число 4000 · 800 = 3 200 000 Дж/с, или 4300 л. с. Наконец, разделив эту мощность на вес действующих частей ружейной конструкции (2 кг), узнаем, что одна лошадиная сила, 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 вопрос об абсолютной мощности, то все рекорды побивает артиллерийское орудие. Пушка бросает ядра в 900 кг со скоростью 500 м/с (и это не является последним словом техники), развивая

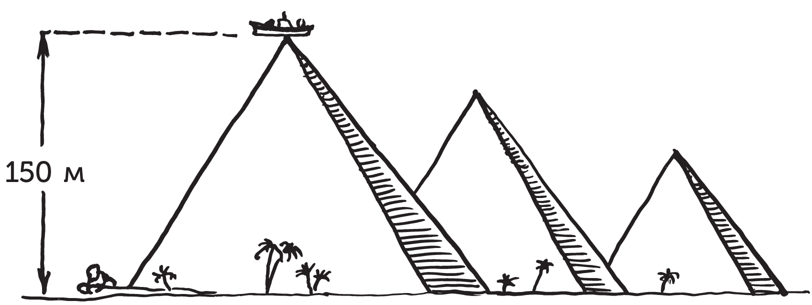


Рис. 66. Энергия снаряда крепостного орудия достаточна для поднятия 75 тонн на верхушку самой высокой пирамиды.

Рис. 67. Теплота, соответствующая кинетической энергии снаряда крупного морского орудия, достаточна для растопления 36 тонн льда.

в сотую долю секунды около 110 миллионов джоулей работы. Рис. 66 дает наглядное представление об этой чудовищной работе: она равнозначаща работе поднятия груза в 75 т (75-тонного парохода) на вершину пирамиды Хеопса (150 м). Работа эта развивается в 0,01 долю секунды; следовательно, мы имеем здесь дело с мощностью в 11 000 миллионов Вт или с 15 миллионами лошадиных сил.

Показателен также и рис. 67, иллюстрирующий энергию крупного морского орудия.

• Отвешивание с «походом»

Иногда недобросовестные продавцы отвешивают товар так: последнюю порцию, необходимую для равновесия, не кладут на чашку, а роняют с некоторой высоты. Коромысло весов резко склоняется в сторону товара, вводя в заблуждение доверчивого покупателя.

Если бы покупатель дождался, пока весы успокоятся, то убедился бы в том, что товара не хватает для равновесия.

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

$$0{,}01\ \text{кг} \cdot 0{,}1\ \text{м} = 0{,}001\ \text{кгм} \approx 0{,}01\ \text{Дж}.$$

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

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

имеем:

$$F = 0{,}05\ \text{кг} = 50\ \text{г}.$$

Итак, порция товара весом всего 10 г, падая на чашку, дает, кроме своего веса, добавочное давление в 50 г. Покупатель обвешен на 50 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 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 $2 \cdot 2 = 4$ 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-й 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

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

откуда сила F = 800 кг.

Это значит, что топор вдвигается в дерево с силой веса 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 дерево непосредственной силой своих мышц; как же может он сообщить топору силу, которой не обладает сам? Причина в том, 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 полтора, 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. Имеет, впрочем, значение и как действовать: боец не только ударяет, но и притягивает в момент удара саблю к себе. Вследствие этого он режет, а не только рубит. Попробуйте разломить хлеб на две части ударом, и вы убедитесь, насколько это труднее, чем разрезать его.

• Упаковка хрупких вещей

При упаковке хрупких вещей прокладывают их соломой, стружками, бумагой и т. п. материалами (рис. 68). 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.

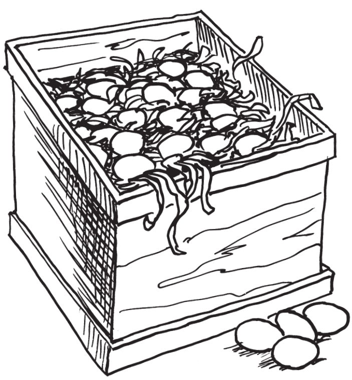


Рис. 68. Для чего яйца при упаковке перекладывают стружкой?

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. Действие силы распространяется на большую площадь, и оттого давление соответственно уменьшается.

Действие второй причины проявляется 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. 69 и 70, устраиваются жителями Восточной Африки. Задевая протянутую у земли бечевку, слон обрушивает

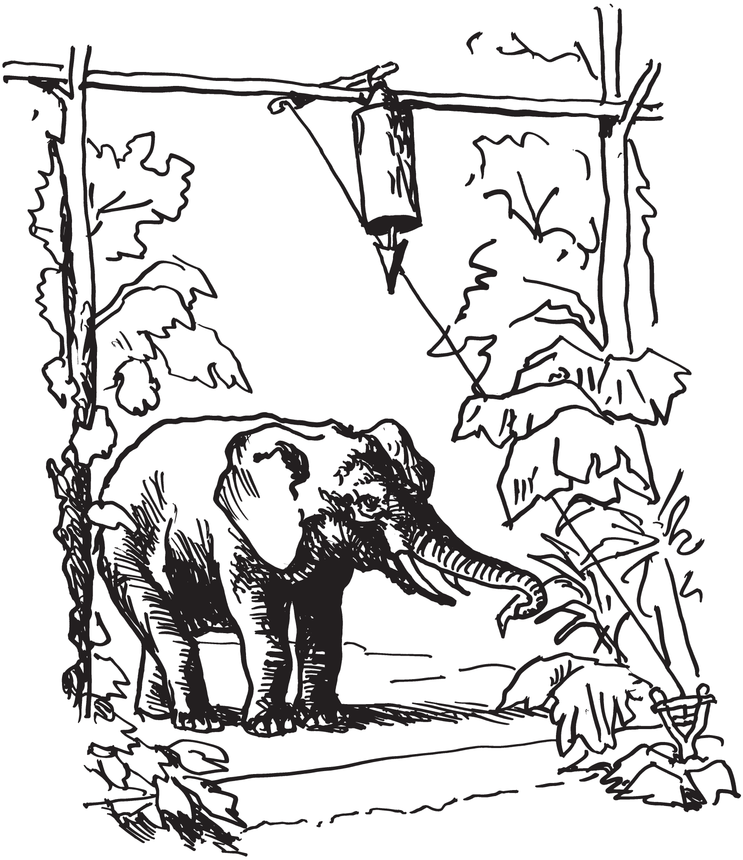


Рис. 69. Слоновая западня в африканском лесу.

на свою спину тяжелый обрубок дерева с острым гарпуном. Больше изобретательности вложено в западню, изображенную на рис. 70: животное, задевшее шнур, спускает спрятанную в зарослях стрелу.

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

Рис. 70. Западня-самострел (Африка).

этого груза на высоту. Стреляющий лук второй западни также возвращает энергию, израсходованную охотником, который натянул тетиву. В обоих случаях животное только освобождает накопленный запас потенциальной энергии. Чтобы действовать в другой раз, западни нуждаются в новом заряжании.

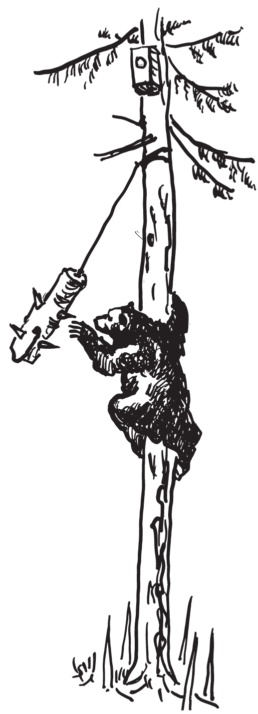


Рис. 71. Медведь в борьбе с подвешенным бревном.

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 дальше (рис. 71). 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 землю.

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, свалевших медведя с дерева?

В этом случае работа производится уже за счет энергии самого животного. Медведь сам свалил себя с дерева. 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 о землю. Словом, медведь сам избивает себя, сам сваливает себя вниз. Чем сильнее животное, тем серьезнее должно оно пострадать от такой потасовки.

• 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

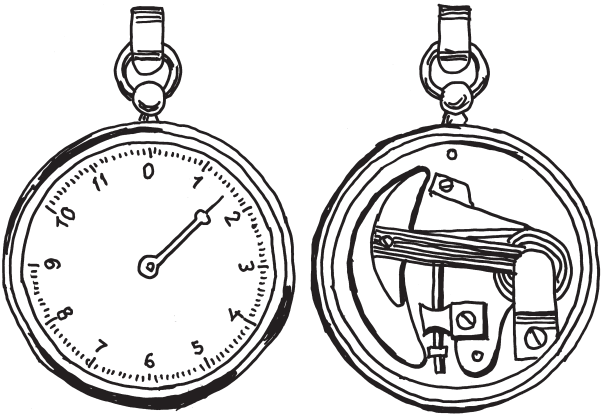


Рис. 72. Шагомер и его механизм.

рис. 72 изображены его циферблат и внутреннее устройство. Главную часть механизма составляет грузик *B*, прикрепленный 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 при помощи 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 было бы заблуждением 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 развивает добавочное усилие, поднимая шагомер на некоторую высоту и преодолевая силу тяжести, а также силу упругости пружины, удерживающей грузик *В*.

Шагомер наводит на мысль устроить карманные часы, которые приводились бы в действие повседневными движениями человека. Такие часы существуют. 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. Казалось бы, что такие часы годны для слесарей, портных, пианистов и особенно для машинисток, а не для работников умственного труда. Но, рассуждая так, мы упускаем из виду одно свойство хорошо слаженных часовых ходов: чтобы заставить такой ход идти, нужен самый незначительный импульс. Оказывается, что два-три движения заставляют тяжелый молоток слегка завести пружину, и завода хватает на 3—4 часа.

Можно ли считать такие часы не нуждающимися в энергии их владельца для поддержания их 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 осуществить его на деле не так-то просто. Вот как рассказывает Марк Твен 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 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 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 первобытные люди, 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 энергия была превращена в тепловую, ее хватило 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 потом. 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, а сверлением дощечки заостренной палочкой.

Разница между этими способами выясняется при ближайшем рассмотрении.

Пусть палочка *CD* (рис. 73) 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

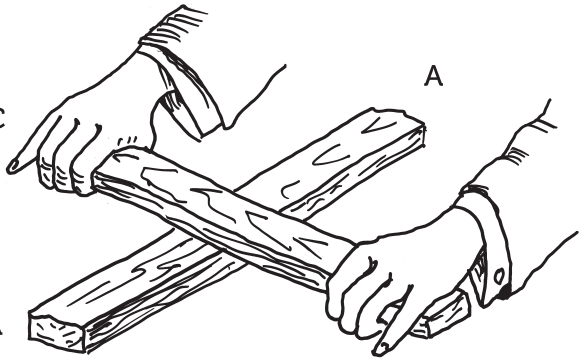


Рис. 73. Книжный способ добывания огня трением.

равна в этом случае $2 \cdot 0{,}4 \cdot 9{,}8 \approx 8$ Н, а работа ее на пути 50 см составляет $0{,}8 \cdot 0{,}5 = 4$ Дж. Если эта механическая работа полностью превратилась в теплоту, то какому объему древесины сообщилась 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[1]. Величина трущейся поверхности 50 см, умноженным на ширину соприкасающейся поверхности, которую примем равной 1 см. Значит, возникающей при трении теплотой прогревается объем дерева в

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

Вес такого объема дерева около 1,25 г. При теплоемкости дерева 2,4 объем этот должен нагреться на

$$\frac{4}{1{,}25 \cdot 2{,}4} = \text{около } 1^\circ.$$

[1] Читатель увидит из дальнейшего, что результат мало меняется, если взять толщину слоя несколько большую.

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

Другое дело — сверление (рис. 74). Пусть поперечник конца вращающейся палочки 1 см и конец этот входит в дерево на 1 см. Размах смычка (2 хода в секунду) 25 см, а сила, приводящая его во вращение, пусть равна 2 кг. Секундная работа равна в этом случае тоже 8 · 0,5 = 4 Дж, и количество возникающей теплоты равно тому же. Но нагреваемый объем дерева заметно мень-

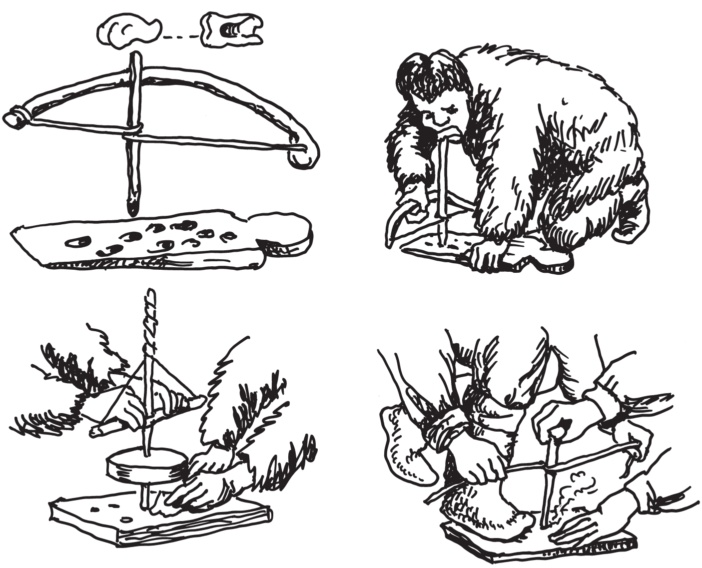


Рис. 74. Как в действительности добывают огонь трением.

ше, чем в первом случае: $3{,}14 \cdot 0{,}05 = 0{,}15$ см^3, а вес его — 0,075 г. Значит, теоретически температура в гнезде палочки должна подняться в секунду на

$$\frac{4}{0{,}075 \cdot 2{,}4} = 22^\circ.$$

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

$$250^\circ : 22^\circ = 11 \text{ с}.$$

Правдоподобие нашего подсчета подтверждается тем, что, по свидетельству этнологов, 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.

• Энергия растворенной пружины

Вы согнули стальную пружину. Затраченная вами работа превратилась в потенциальную энергию напряженной пружины. Вы можете вновь получить

[1] Кроме сверления, у первобытных народов практикуются и иные способы добывания огня трением — с помощью «огневого плуга», а также «огневой пилы». В обоих случаях нагревающимся частям древесины — древесной муке — обеспечивается защита от охлаждения.

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.

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, *средняя* величина силы, сгибавшей пружину, равнялась 1 кг. Отсюда потенциальная энергия пружины равна $1 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}1 = 1$ Дж. Такое незначительное (1 Дж) 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.

Стальная полоска в *согнутом* положении была зажата между двумя стеклянными палочками, установленными на дне стеклянного сосуда в полусантиметре одна от другой (рис. 75 слева). В другом опыте пружина упиралась прямо в стенки сосуда (рис. 75 справа). В сосуд налили серную кислоту. 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 *несогнутом* состоянии при вполне одинаковых прочих условиях. Оказалось, что растворение ненапряженной полоски потребовало *меньше* времени.

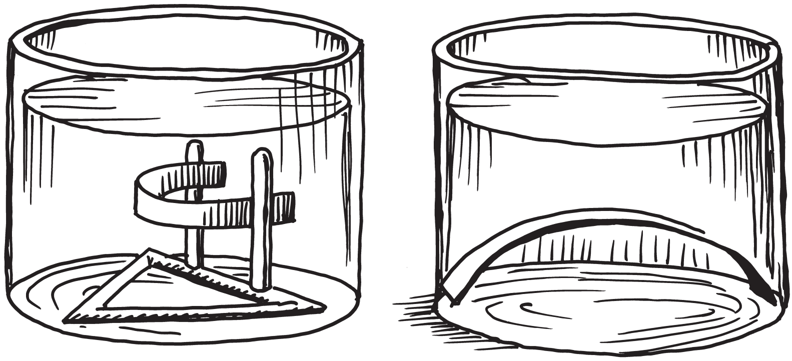


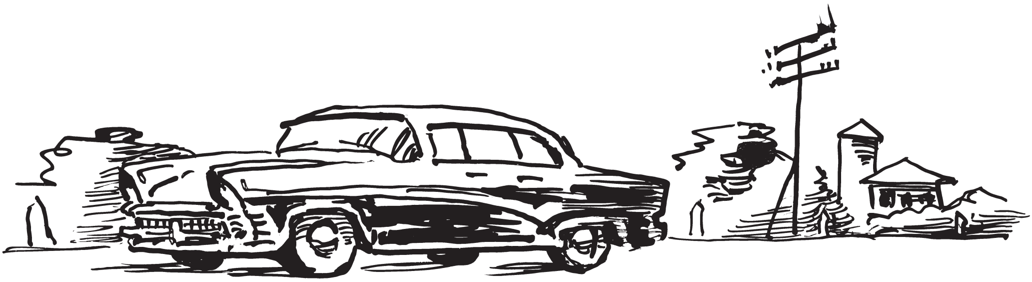
Рис. 75. Опыт с растворением напряженной пружины.

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 можно поставить такой вопрос:

«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: коэффициент 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* (рис. 76), с которой 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. Разложим вес P на две составляющие: нормальную Q и касательную R. Трение составляет 0,02 силы Q, равной $P\cos 30^\circ$, т. е. $0{,}87P$. Следовательно, преодоление трения поглощает

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

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 $0{,}02Px$ кгм. Из уравнения

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

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

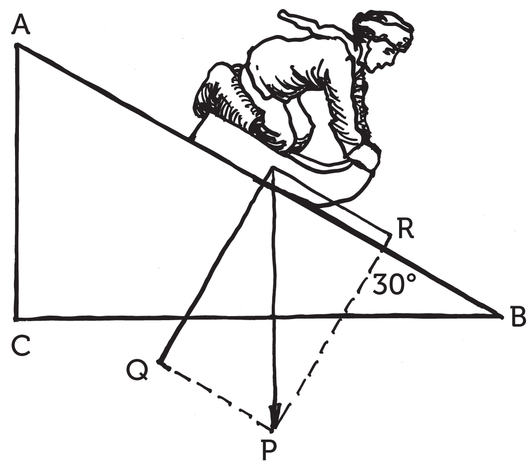


Рис. 76. Как далеко прокатятся санки?

• С выключенным мотором

ЗАДАЧА

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

РЕШЕНИЕ

Задача эта сходна с предыдущей, но накопленный 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% его веса P. Имеем уравнение

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

Так как вес P автомобиля равен mg, где g — ускорение силы тяжести, то уравнение принимает вид:

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

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 его массы. Подставив v = 20 м/с, g = 9,8 м/с^2, получаем, что искомое расстояние равно приблизительно 1000 м; автомобиль проедет по ровной дороге целый километр. Такое большое расстояние получилось потому, что при расчете мы не приняли во внимание сопротивление воздуха, которое быстро возрастает вместе со скоростью.

• 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 найти правильный ответ, 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. 77 поясняет, почему при наклонном положении оглоб-

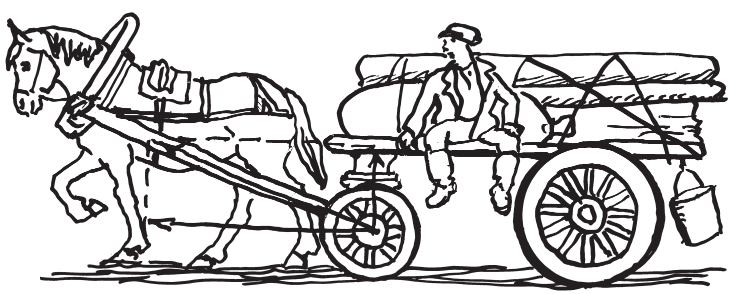


Рис. 77. Почему передние колеса выгодно делать маленькими?

ли *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. 77, правая часть) 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. Что касается автомобилей и двухколесных велосипедов, то у них и прежде колеса делались одинаковыми.

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. Сила трения катящегося тела обратно пропорциональна 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. Можно сказать, что энергия трамвайной электростанции целиком расходуется на то, чтобы согревать воздух города, — работа трения превращается в теплоту. Не будь вредных сопротивлений, поезд, разогнавшись в течение первых 10—20 с, двигался бы по инерции на горизонтальном пути 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]. Гребец легко может двигать лодку со скоростью 6 км/час; но увеличение скорости еще на 1 км/час 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 увле-

---

[1] Сказанное не относится к тем судам (так называемым *глиссерам*), которые *скользят по воде*, почти не погружаясь в нее; встречая поэтому со стороны воды лишь незначительное сопротивление, глиссеры способны развивать сравнительно большие скорости.

кающая 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 крупные, — 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

Рис. 78. Горный поток перекатывает камни.

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 (рис. 78). 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.

Для простоты вообразим каменный кубик с ребром a (рис. 79), лежащий на дне реки. На боковую его грань S действует сила F — напор текущей воды. Она стремится повернуть кубик вокруг ребра AB. Этому противодействует сила P — вес кубика в воде, препятствующая повороту кубика вокруг этого 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

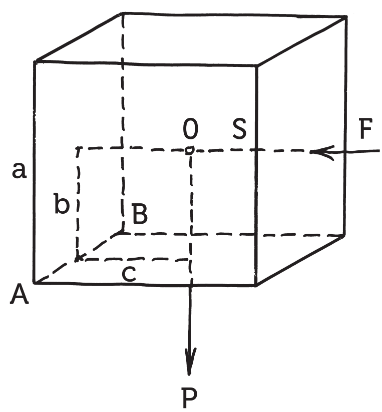


Рис. 79. Силы, действующие на камень в текущей воде.

произведение величины этой силы на ее расстояние от оси. Для силы F момент равен Fb, для силы P он равен Pc (рис. 79). Но $b = c = \frac{a}{2}$. Следовательно камень останется в покое лишь тогда, когда

$$F \cdot \frac{a}{2} \leq P \cdot \frac{a}{2}, \text{ т. е. } F \leq P.$$

Далее применим формулу

$$Ft = mv,$$

где t означает продолжительность действия силы, m — масса воды, участвующая в напоре за t секунд, v — скорость течения.

В гидродинамике доказывается, что полное давление струи воды на пластинку, перпендикулярную к направлению движения воды, пропорционально площади пластинки и квадрату скорости течения воды. Значит,

$$F = ka^2v^2.$$

Вес P куба в воде равен 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 $F \leq P$. принимает вид:

$$ka^2v^2 \leq a^3(d - 1),$$

откуда

$$a \geq \frac{v^2}{k(d - 1)}.$$

Ребро a куба, могущего противостоять потоку, скорость которого v, пропорционально второй степени скорости. 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 нетрудно получить вывод для тел любой формы. Наш вывод приближенный и имеет значение только для ориентировки. Современная гидродинамика дает более обоснованное решение.

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 $^1/_4$ г 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 килограммов.

• Скорость дождевых капель

Косые линии дождевых струй на оконных стеклах движущегося вагона (рис. 80) свидетельствуют о замечательном явлении. Здесь происходит сложение двух движений по правилу параллелограмма, так как капли дождя, падая вниз, участвуют одновременно и в движении поезда. Заметьте,

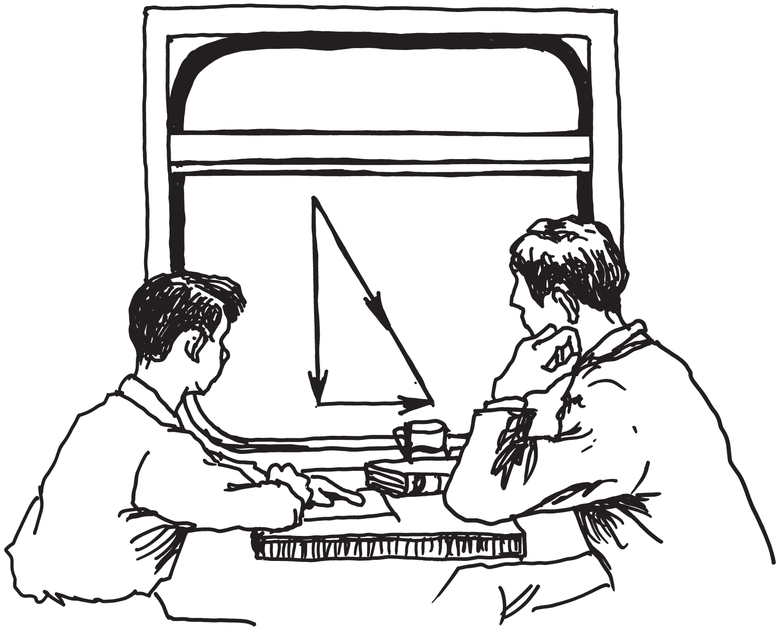


Рис. 80. Косые струи дождя в окне вагона.

что результирующее движение получается здесь *прямолинейное*. 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 *равномерным*. 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 при равноускоренном падении).

Итак, дождевые капли падают не с ускорением, как уроненный камень, а равномерно. Причина та, что сопротивление воздуха нацело уравновешивает вес капли, порождающий 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 со скоростью

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 2000} \approx 200 \text{ м/с}.$$

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

---

[1] В первую 10-ю долю секунды, например, свободно падающее тело проходит всего 5 см.

[2] При скорости от нескольких метров в секунду примерно до 200 м/с сопротивление воздуха растет пропорционально *квадрату* скорости.

свободном падении. Потом ускорение продолжает уменьшаться и практически 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 капелек в 0,03 мг она равна 1,7 м/с, для 20 мг — 7 м/с, а для самых крупных, весом 200 мг, скорость достигает 8 м/с; большей скорости не наблюдалось.

Очень остроумен способ измерения скорости дождевых капель. Прибор (рис. 81) состоит из двух дисков, наглухо насаженных на общую вертикальную ось. Верхний диск имеет прорез в форме узкого сектора. Прибор выносят под зонтом на дождь, приводят в быстрое вращение и убирают зонт. Капли дождя, проходя через прорез, падают на нижний круг, устланный пропускной бумагой. За время, в течение которого капля движется между дисками, диски успевают повернуться на некоторый угол, и следы капель, упавших на нижний

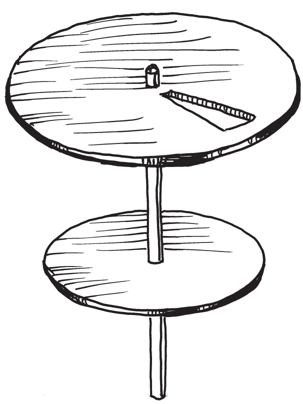


Рис. 81. Прибор для измерения скорости дождя.

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) в тот промежуток времени, в течение которого диск, делающий 20 оборотов в минуту, успевает повернуться на 20-ю долю оборота. Этот промежуток времени равен

$$\frac{1}{20} : \frac{20}{60} = 0{,}15 \text{ с.}$$

В 0,15 с капля прошла 0,4 м; значит, скорость падения капли равна

$$0{,}4 : 0{,}15 = 2{,}6 \text{ м/с.}$$

(Совершенно подобным же способом может быть измерена скорость полета пули.)

Что касается *веса* 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.

Интересно посмотреть, как скорость капли меняется в зависимости от веса.

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

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 постоянной скоростью.

Даже брошенные с аэроплана шрапнельные пули (свинцовые шарики, около 1,5 см в диаметре) достигают земли с постоянной 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 большая 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» (условная единица), 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, большее 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 под 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 *отвесно*. 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 *отставать* от тяжелого. Другими словами, шар железный должен падать в воздухе быстрее, чем равный ему по объему 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. конец предыдущего раздела).

Приведем еще такой пример. Приходилось ли вам, стоя на горе, развлекаться тем, что вы бросали камни под гору? В таком случае вы не могли не заметить, что крупные камни, как правило, проходили до остановки больший путь, чем малые. Объяснение простое: и большой и малый камень встречают одинаковые препятствия на пути, но большой камень, имея большой запас энергии, легче преодолевает такие препятствия, которые задерживают малый камень.

Величину поперечной нагрузки важно учитывать при расчете продолжительности жизни искусственных спутников Земли. Чем большая масса приходится на квадратный сантиметр поперечного сечения спутника, тем дольше — при прочих равных условиях — продержится спутник на орбите вокруг Земли, так как на его движении в меньшей степени будет сказываться сопротивление воздуха. Поэтому, например, третий советский спутник гораздо дольше двигался вокруг Земли, чем второй спутник, хотя его орбита сравнительно мало отличалась от орбиты второго спутника.

Если искусственный спутник Земли после выведения его на орбиту отделяется от последней ступени ракеты-носителя, то, как известно, эта ступень движется вокруг Земли в качестве самостоятельного искусственного спутника. Интересно, что отделившийся от ракеты-носителя контейнер с приборами всегда дольше движется вокруг Земли, чем последняя ступень ракеты-носителя, хотя первоначальные орбиты обоих тел почти не отличаются друг от друга. Это происходит оттого, что поперечная нагрузка пустой ступени (ее топливо выгорело при выведении спутника на орбиту) всегда меньше поперечной нагрузки спутника, плотно заполненного разнообразной научной аппаратурой.

Во время полета спутника его поперечная нагрузка не остается постоянной, так как вследствие беспорядочного «кувыркания» спутника площадь его поперечного сечения, перпендикулярного направлению движения, беспрерывно изменяется. Только у спутника, имеющего форму шара, поперечная нагрузка остается все время неизменной. Поэтому наблюдение движения таких спутников особенно удобно для изучения плотности атмосферы на больших высотах. Шарообразную форму, как известно, имел первый советский искусственный спутник Земли.

• 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 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 большую окончательную скорость.

Отсюда следует, что, например, весло, упущенное 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.

Чтобы наглядно иллюстрировать все сейчас изложенное, приведем интересный рассказ одного путешественника:

«Я участвовал в экскурсии 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».

• **Как руль управляет судном**

Всем известно, что маленький руль направляет движение большого корабля. Как это происходит?

Пусть корабль (рис. 82) движется под действием какого-либо двигателя в направлении, указанном стрелкой. Вместо того, чтобы рассматривать движение корабля относительно воды, можно считать корабль неподвижным, а воду текущей в направлении, противоположном движению корабля. Вода давит на руль *A* с силой *P*, которая поворачивает корабль вокруг его центра тяжести *C*. Чем больше скорость корабля по отношению к воде, тем лучше он слушается руля. Если корабль не движется относительно воды, то рулем его нельзя повернуть.

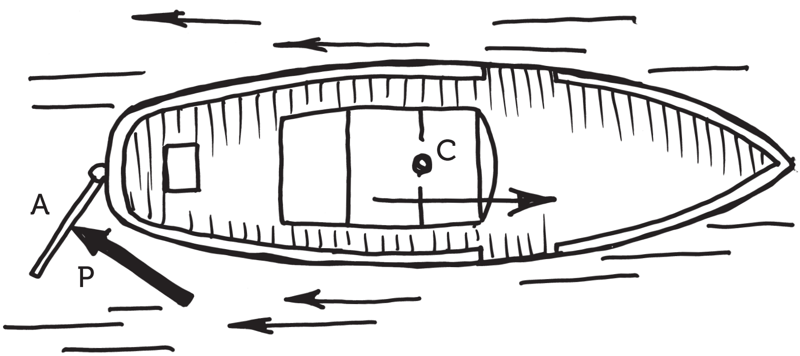


Рис. 82. При движении корабля под действием двигателя руль прикрепляется на корме.

Расскажем об одном замечательном способе, к которому когда-то прибегали на Волге для управления большими белянами, плывшими по течению без тяги. Руль *A* устраивали на носу

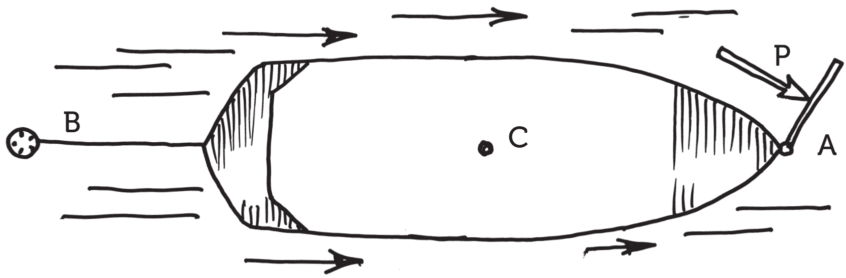


Рис. 83. При движении, более медленном чем течение, руль нужно прикрепить на носу.

(рис. 83), а с кормы в тех случаях, когда нужно поворачивать беляну, выбрасывали на канате груз *B*, который волочился по дну. Наличие этого груза и делало громадное судно управляемым. Почему? А потому, что беляна с лесом двигается медленнее воды; относительное движение воды происходит в сторону движения беляны, и вода оказывает давление на руль только в сторону, противоположную по сравнению со случаем, когда судно при наличии двигателя движется быстрее воды. Автор замечательной выдумки — народ.

- **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, на его крышу ежесекундно попадает вода, заключенная, в виде дождевых капель, в прямой призме, основанием которой служит крыша вагона, а высотой — скорость *V* отвесного падения капель (рис. 84).

Труднее учесть количество дождевой воды, выпадающей на крышу *движущегося* вагона. Поступим следующим образом. Вообразим, что и вагон, движущийся со скоростью *C*, и вся совокупность падающих дождевых капель получили такое движение относительно земли, которое равно и противоположно действительному движению вагона. Тогда вагон сделается относительно

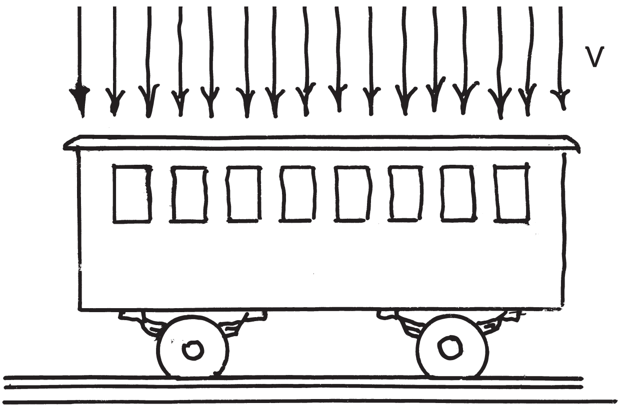


Рис. 84. Дождь, падающий отвесно на неподвижный вагон.

земли неподвижным, капли же дождя будут совершать относительно этого неподвижного вагона двоякое движение: отвесное падение со скоростью *V* и горизонтальное перемещение навстречу вагону со скоростью *C*. Результирующая скорость V_1 будет наклонена к крыше вагона; иными словами, вагон словно окажется под косым дождем (рис. 85).

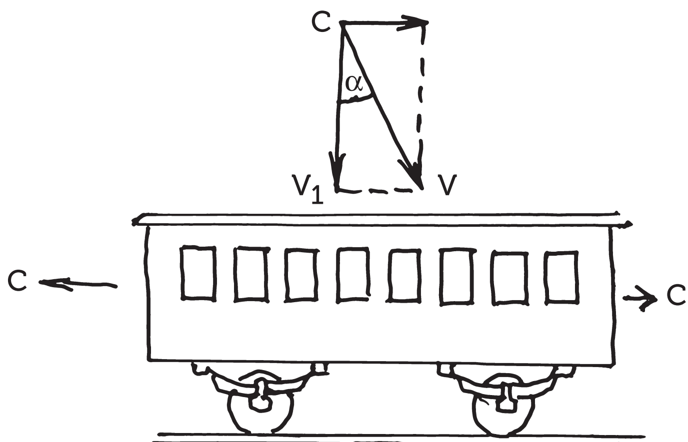


Рис. 85. То же в случае движущегося вагона.

Теперь ясно, что совокупность капель, ежесекундно попадающих на крышу движущегося вагона, целиком заключается в пределах наклонной призмы, основанием которой по-прежнему служит крыша вагона (рис. 86), а боковые ребра наклонены под углом α к вертикали и равны V_1. Высота этой призмы равна

$$V_1 \cos \alpha = V.$$

Итак, обе призмы, о которых была речь: прямая (в случае вертикально падающего дождя) и наклонная (в случае косого дождя) имеют общее основание (крыша вагона) и равные высоты, а потому равновелики. 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.

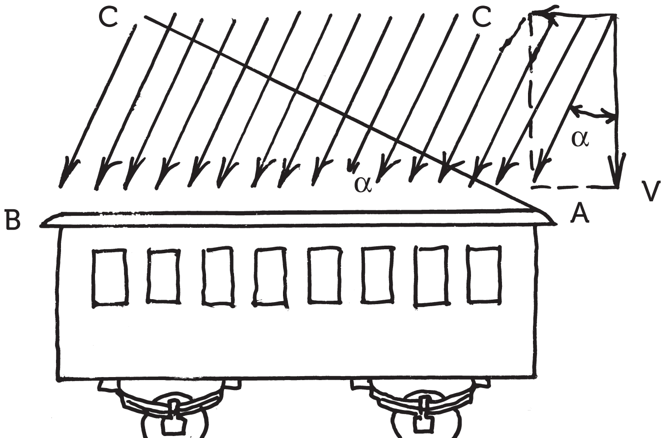
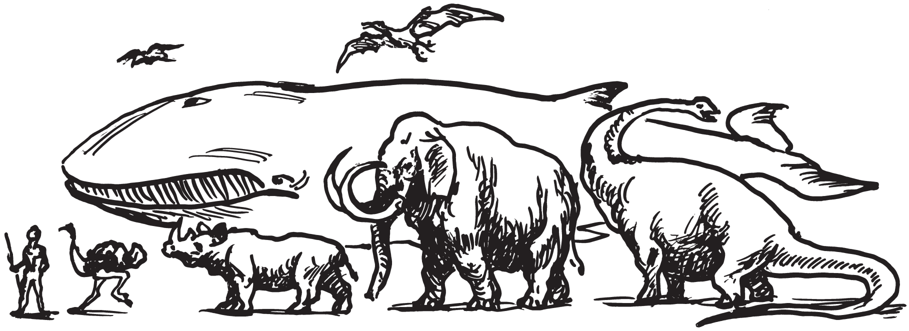


Рис. 86. Дождь, падающий на крышу движущегося вагона.



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. Оба поднимают вверх правую руку. Вес руки Гулливера p, а великана P. Первый поднимает центр тяжести своей руки на высоту h, второй — на H, Значит, Гулливер совершает работу ph, а великан PH. Найдем соотношение между этими величинами.

Вес P руки великана больше веса р руки Гулливера во столько раз, во сколько больше ее объем, т. е. в 12^3 раз. Высота Н больше h в 12 раз. Итак,

$$P = 12^3 \cdot p,$$
$$H = 12 \cdot h.$$

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 большую 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 большим *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 рабо-

---

[1] «Учебник физиологии» Фостера.

тоспособность 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 работоспособность 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 $3^1/_2$ 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, но имеющие разные размеры, не могут обладать одинаковой свободой движений.

Если бы мускулы бегемота были геометрически подобны мускулам лемминга, бегемот был бы относительно слабее лемминга в

$$\frac{400}{15} \approx 27 \text{ раз.}$$

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 и обладает таким массивным скелетом. Рис. 87, на котором представлены в одинаковых размерах

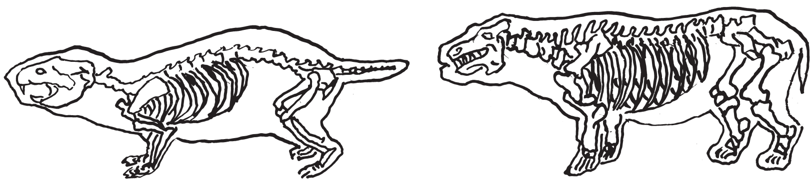


Рис. 87. Скелет бегемота (направо), сопоставленный со скелетом лемминга, причем кости бегемота по длине уменьшены до размеров костей этого грызуна. Бросается в глаза непропорциональная массивность костей бегемота.

Млекопитающие	Вес скелета в %	Птицы	Вес скелета в %
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		

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.

- **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 появлению подобных форм, пока размеры их весьма невелики. Но существование подобного животного при величине, скажем, с лисицу было бы 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 в 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 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 (рис. 88) 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, указанный закон зани-

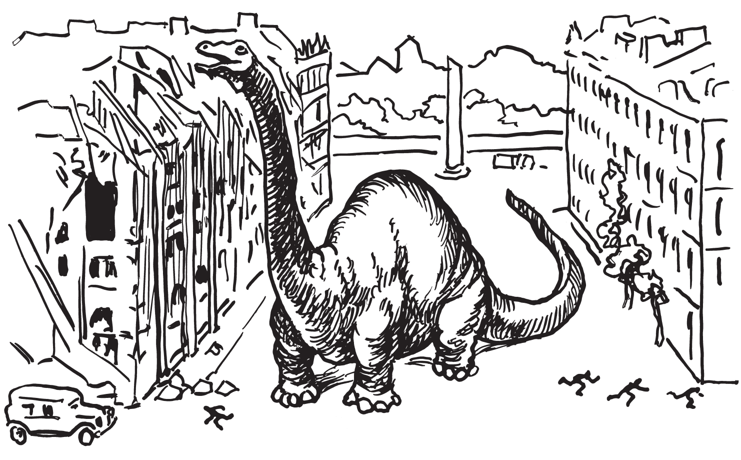


Рис. 88. Исполин древних геологических эпох, перенесенный на улицу современного города.

мал одно из самых видных мест. Кит не может идти в счет: он живет в воде, вес его уравновешивается давлением воды на его тело, и все сейчас сказанное к нему не относится (см. заставку к этой главе).

Можно поставить вопрос: если большие размеры так невыгодны для жизни организма, то почему эволюция не шла в направлении измельчения животных форм? Причина та, что крупные формы все же *абсолютно* 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 высота прыжка блохи (до 40 см), более чем в сотню раз превосходящая ее рост; нередко высказывают мнение, что человек мог бы состязаться с блохой лишь в том случае, если бы способен был подпрыгивать на высоту $1{,}7\text{ м} \cdot 100 = 170\text{ м}$ (рис. 89).

Механический расчет восстанавливает репутацию человека. Для простоты будем считать тело блохи геометрически подобным телу человека. Если блоха весит 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

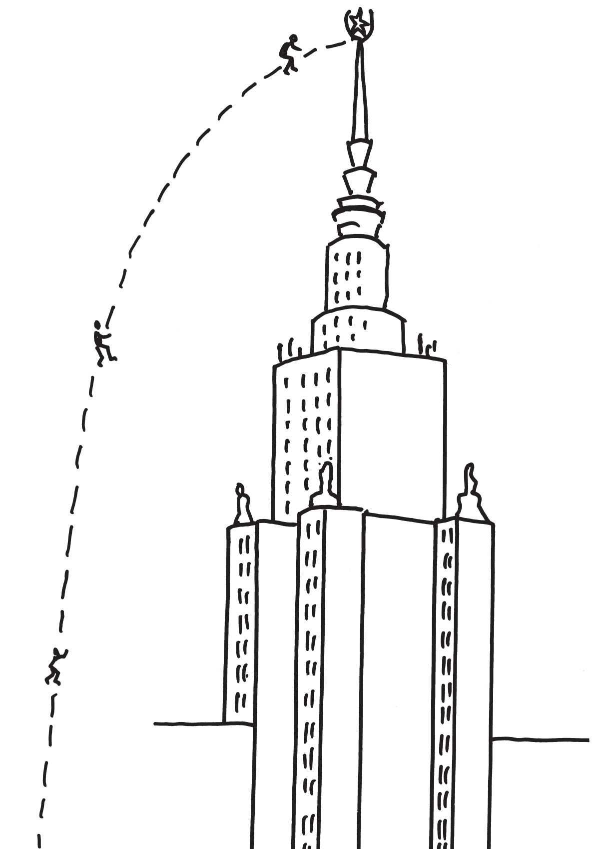


Рис. 89. Если бы человек прыгал, как блоха ...

(вернее — высота подъема его центра тяжести). Так как человек примерно раз в 300 выше блохи, то вес его тела можно принять равным 300^{3}°p, и, следовательно, работа прыжка человека равна 3003 pH. 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. Поэтому мы в праве требовать у него затраты энергии лишь в 300^3 большей.

Но если

$$\frac{\textit{работа человека}}{\textit{работа блохи}} = 300^3,$$

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 27000000 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:

$$\left.\begin{array}{ll}\text{Кузнечик прыгает на} & 30\\ \text{Тушканчик прыгает на} & 15\\ \text{Кенгуру прыгает на} & 5\end{array}\right\}\begin{array}{l}\text{-кратную}\\ \text{длину тела}\end{array}$$

• 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 лилипутов, несшие нагрузку в 12 раз меньше нормальной.

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 г

Птицы

Береговая ласточка (20 г)	0,14 г
Сокол (260 г)	0,38 г
Орел (5000 г)	0,63 г

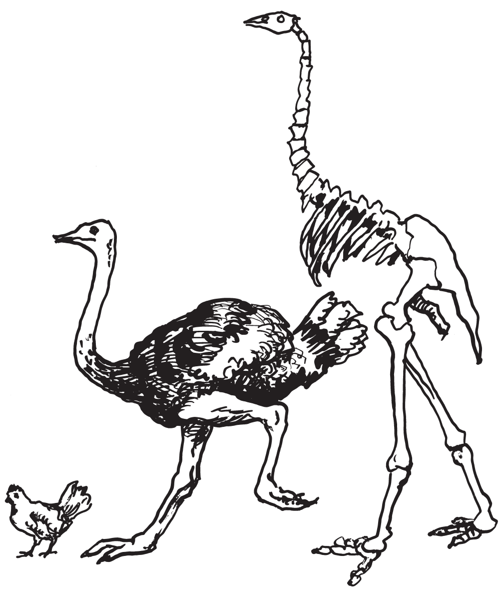


Рис. 90. Страус рядом со скелетом вымершей мадагаскарской птицы — эпиорниса. Слева для сравнения — курица.

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) не способны летать (рис. 90); 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

[1] По новейшим исследованиям этот вид еще жил на Земле в начале XVII века.

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 лилипутов, упав с дерева рассыпным дождем, пострадали бы мало; но если бы те же лилипуты упали плотным комом, то расположенные выше раздавили бы нижних. Человек нормального роста представляет собой словно ком из 1728 лилипутов. Вторая причина безвредности падения мелких существ кроется в большей гибкости их частей. Чем стержень или пластинка тоньше, тем больше сгибаются 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 возрастут 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 10000 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».

Нас поражает необыкновенная прочность соломины, достигающей, например, у ржи $1^1/_2$ м высоты при ничтожной толщине 3 мм. Самое стройное сооружение строительного искусства — труба, достигающая 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

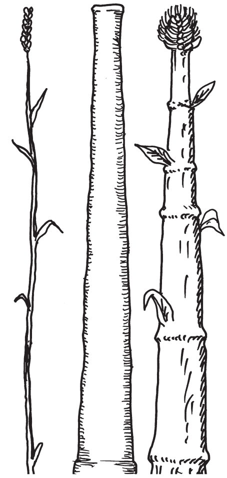
---

[1] Кроме случая, когда ствол, утоньшаясь кверху, имеет форму так называемого «бруса равного сопротивления».

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.

Непропорциональное утолщение растительных форм с увеличением их высоты легко проследить на ряде примеров.

Если длина стебля ржи ($1^1/_2$ 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 (см. также рис. 91).



а) б) в)

Рис. 91. Стебель ржи **(а)**, заводская труба **(б)** и воображаемый стебель 140 м высоты **(в)**.

• 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 костяк 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 (Ариосто в «Неистовом Роланде»), 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 (рис. 92). 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

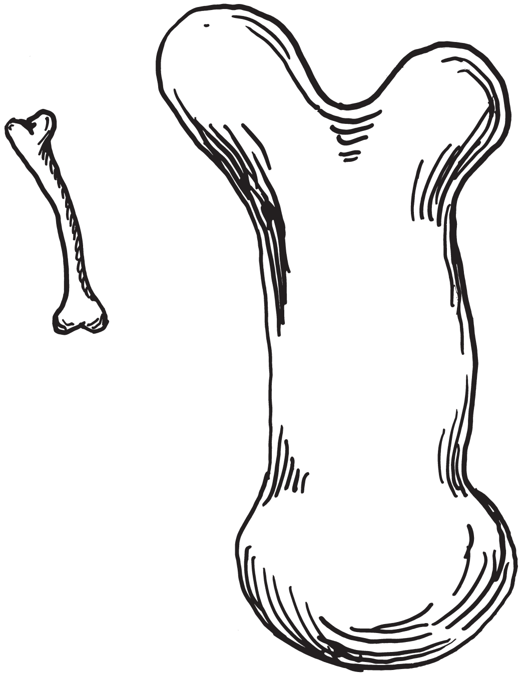


Рис. 92. Так должна увеличиться в толщину кость животного, чтобы она могла служить ему с такой же надежностью, с какой тонкая кость служит животному, в три раза меньшему.

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 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, а в то время как лошадь едва ли может нести на спине одну только другую лошадь, равную ей по величине.

Симпличио. У меня есть достаточный повод сомневаться в справедливости сказанного вами, а именно, огромная величина тела, встречаемая рыб, так, например, кит[1] равен по величине, если я не ошибаюсь, десяти слонам, и однако же тело его все же держится.

Сальвиати. 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.

Симпличио. 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

---

[1] В эпоху Галилея кита причисляли к рыбам. В действительности кит — млекопитающее, дышащее легкими; тем поучительнее тот факт, что кит — животное водное.

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 кости рыб не отягощаются 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 тела такого большого размера, как у кита, не должно было бы существовать.

Сальвиати. 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?

Симпличио. Это всем известное явление.

Сальвиати. 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 прийти 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, им 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».

СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ТЕЛ ПРИРОДЫ ОТ ПРОТОНА ДО МИРОЗДАНИЯ

ДЛИНЫ		**ОБЪЕКТЫ**
10^{p} см	*p*	
1 биллион св. лет	30	
1 квадриллион км 100 млрд св. лет	29	«Радиус» мира
100 000 трлн км 10 млрд св. лет	28	
10 000 трлн км 1 млрд св. лет	27	
1000 трлн км 100 млн св. лет	26	Расстояние до самой далекой туманности
100 трлн км 10 млн св. лет	25	Расстояние до спиральных туманностей
10 трлн км Единица А	24	Расстояние до туманности Андромеды
1 трлн км 100 000 св. лет	23	Расстояние до Магеллановых облаков
100 000 блн км 10 000 св. лет	22	
10 000 блн км 1000 св. лет	21	Среднее расстояние до звезд 10-й величины
1000 блн км 100 св. лет	20	Расстояние до звезд Большой Медведицы
100 блн км 10 св. лет	19	Расстояние до Сириуса

10 блн км 1 св. год	18	
1 блн км 0,1 св. года	17	
100 млрд км 0,01 св. года	16	Афелии комет
10 млрд км	15	Диаметр орбиты Нептуна
1 млрд км	14	
100 млн км	13	Диаметр звезды-гиганта
10 млн км	12	
1 млн км	11	Диаметр Солнца
100 000 км	10	Диаметр Юпитера
10 000 км	9	Четверть меридиана Диаметр Земли
1000 км	8	Москва—Волгоград
100 км	7	Длина железнодорожной ветки
10 км	6	Ширина города
1 км	5	Длина улицы
100 м	4	Радиомачта
10 м	3	Ширина зала

1 м	2	Высота стола
1 дм	1	Ширина ладони
1 см	0	Толщина пальца
1 мм	–1	Толщина проволоки
0,1 мм = 100 μ	–2	Толщина волоса
0,01 мм = 10 μ	–3	Граница видимости для невооруженного глаза
0,001 мм = μ	–4	Мельчайшая бактерия
0,0001 мм	–5	Граница видимости в микроскоп
0,000 01 мм	–6	Тончайшая пленка мыльного пузыря
0,000 001 мм = 1	–7	Диаметр молекул
0,000 000 1 мм = = 1Å	–8	Диаметр атома водорода
	–9	
1 миллиардная мм	–10	Длина волн гамма-лучей
Единица «икс»	–11	
1 биллионная см	–12	Волны космических лучей

1 биллионная мм	–13	«Радиус» электрона
	–14	
	–15	
	–16	Радиус протона
	–17	
1 триллионная см	–18	
1 триллионная мм	– 19	
	– 20	

Содержание

Глава первая. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

Глава вторая. СИЛА И ДВИЖЕНИЕ

Глава третья. ТЯЖЕСТЬ

Глава седьмая. КОЕ-ЧТО О ПРОЧНОСТИ

Глава восьмая. РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

Глава девятая. ТРЕНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ

Глава десятая. МЕХАНИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Серия «Простая наука для детей»
Научно-популярное издание
ғылыми-бұқаралық баспа
Для среднего школьного возраста

Яков Исидорович Перельман
ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА И МЕХАНИКА

Художник Юрий Станишевский

Дизайн обложки *Н. Ворламовой*
Редактор *А. Мещерякова*. Художественный редактор *Е. Гордеева*
Технический редактор Е. Кудиярова. Компьютерная верстка *А.Филатовой*

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС),
58.11.1 — книги, брошюры печатные
Книжная продукция – ТР ТС 007/2011
Подписано в печать 21.01.2019. Изготовлено в 2019 году.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Pragmatica C.
Усл. печ. л. 15,0. Тираж экз. Заказ №

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, Российская Федерация, г. Москва, Звездный бульвар, дом 21,
строение 1, комната 705, пом. I, 7 этаж.
Наш электронный адрес: malysh@ast.ru. Home page: www.ast.ru

Мы в социальных сетях. Присоединяйтесь!
https://vk.com/AST_planetadetstva
https://www.instagram.com/AST_planetadetstva
https://www.facebook.com/ASTplanetadetstva

«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.
Біздің электрондық мекенжаймыз: www.ast.ru
E-mail: malysh@ast.ru
Интернет-магазин: www.book24.kz
Интернет-дүкен: www.book24.kz

Импортер в Республику Казахстан и Представитель по приему претензий
в Республике Казахстан — ТОО РДЦ Алматы, г. Алматы.
Қазақстан Республикасына импорттаушы және Қазақстан Республикасында наразылықтарды қабылдау бойынша өкіл –«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ.,Домбровский көш., 3«а», Б литері, офис 1. Тел.: 8(727) 2 51 59 90,91 ,факс: 8 (727) 251 59 92 ішкі 107;
E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz , www.book24.kz
Тауар белгісі: «АСТ»
Өндірілген жылы: 2019
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.
Сертификация – қарастырылған

6+

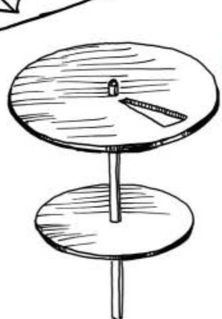
Сколько сил действует на движущийся предмет? Ответить несложно, если ты уже начал изучать физику и механику — один из ее разделов, посвященных изучению движения тел и их взаимодействия.
Из этой книги ты узнаешь:

- **Что такое противодействие**
- **Как измерить скорость дождя**
- **Почему деревья не растут до неба**
- **Как вычислить тягу**
- **Почему бегемот неуклюж**
- **Какой материал крепче всего**

...и многое-многое другое!

Необычные примеры и хитроумные задачи Якова Исидоровича Перельмана сделают науку интереснее!

Аванта



6+ ЕАС

www.ast.ru

ISBN 978-5-17-098897-6