Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

# ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

„ВРЕМЯ"

Я. И. ПЕРЕЛЬМАН — ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

# ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

С 120 РИСУНКАМИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ДОПОЛНЕННОЕ

КООПЕРАТИВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВРЕМЯ»
ЛЕНИНГРАД

РИСУНОК НА КРЫШКЕ,
ФОРЗАЦ И РИСУНКИ
В ТЕКСТЕ РАБОТЫ
Ю. Д. СКАЛДИНА

1933

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Две книги „Занимательной физики“, которым суждено было разойтись более чем в ста тысячах экземпляров, сделали то, что читатели, сталкиваясь на практике с затруднительными физическими задачами, нередко обращаются за их разрешением к автору названных книг. Чрезвычайно поучительно разнообразие этих вопросов: в них встречается все — от хозяйственного затруднения до задач большой техники и научных вопросов из смежных областей знания. Домашняя хозяйка спрашивает, полезно ли, замазывая на зиму окна, оставлять в наружной раме щели, как делают маляры. Кинофабрика, театр просят указаний о способе осуществления трюка или сценического эффекта. Врач лазарета просит по телефону немедленно разрешить такой вопрос: наложенная на рану марля пропиталась гноем, и надо отсосать гной, не делая новой перевязки; какую для этого нужно положить марлю поверх намокшей—с более крупными или с более мелкими ячейками? Автор медицинской диссертации о шумах в венах нуждается в указаниях относительно движения жидкостей в трубках. Воздухоплаватель желает обсудить некоторые случаи движения дирижабля в потоке воздуха. Различные изобретатели—в том числе, конечно, и „вечного двигателя"—просят проверить правильность их основной идеи. Даже судостроительному заводу понадобились однажды услуги автора „Занимательной физики" для расчета, относящегося к спуску судна на воду, а Бюро жалоб РКИ—для разъяснений о причине движения паровоза.

Приведенный ряд не вымышленных, а самою жизнью поставленных вопросов убедительно доказывает поистине всеобъемлющее значение физики и теснейшее ее отношение ко всем сторонам жизни.

Если „естествознание есть грамотность мысли", то всего более справедливо это для физики, без овладения которой нельзя грамотно рассуждать ни в одной отрасли знания.

Распространение у нас физических знаний, к сожалению, далеко еще не отвечает исключительной важности этой науки. Особенно смутны в широких кругах представления из того отдела физики, который служит ее основой: из механики, учения о движении и силах. А „кто не знает движения, тот не понимает природы" (Аристотель).

Хотя вопросам механики отведено не мало страниц в обеих книгах „Занимательной физики", я счел полезным посвятить механике отдельную книгу, написанную в той же манере.

„Занимательная механика" не спешит ознакомить читателя с последними достижениями науки, пока не выяснены первые ее основы. Она не излагает, впрочем, своего предмета с учебной систематичностью. Предполагая у читателя некоторые, хотя бы смутно усвоенные или полузабытые сведения, книга стремится освежить и уточнить их разбором ряда механических задач, любопытных в том или ином отношении. Не притязает книга и на исчерпание всех отделов механики: многие интересные вопросы не рассмотрены, иные — едва затронуты.

Цель „Занимательной механики“ — разбудить дремлющую мысль и привить вкус к занятию механикой; любознательный читатель сам тогда разыщет и приобретет недостающие сведения.

Вопреки установившемуся для популярных книг обычаю, в „Занимательной механике“ попадаются математические выкладки.

Мне известна неприязнь, которую многие питают к таким местам книг. И все же я не избегаю расчетов, так как считаю физические знания, приобретенные без расчетов, шаткими и практически бесплодными. Немыслимо получить сколько-нибудь полезные и прочные сведения из физики и особенно из механики, минуя относящиеся к ним простейшие расчеты.

В „Кодексе Юстиниана“ (VI век) имеется закон „о злодеях, математиках и им подобных“, в силу которого „безусловно воспрещается достойное осуждения математическое искусство“. В наши дни математики не приравниваются к злодеям, но их „искусство“ в популярных книгах безусловно воспрещается.

Я не сторонник такой популяризации. Не для того тратим мы целые годы в школе на изучение математики, чтобы выбрасывать ее за борт, когда она понадобится. „Занимательная механика“ прибегает к расчетам всюду, где необходимо внести ясность в вопрос; излишне добавлять, что эти математические злодеяния совершаются в скромных пределах школьного курса.

Последняя глава этой книги — „Занимательная прогулка в страну Эйнштейна“ — написана талантливым ленинградским математиком О. А. Вольбергом. Она представляет собою совершенно своеобразную и чрезвычайно удачную попытку общепонятного изложения сущности теории относительности. За предоставление этой превосходной статьи для „Занимательной механики" считаю себя приятно обязанным выразить здесь признательность автору.

*Я. П.*

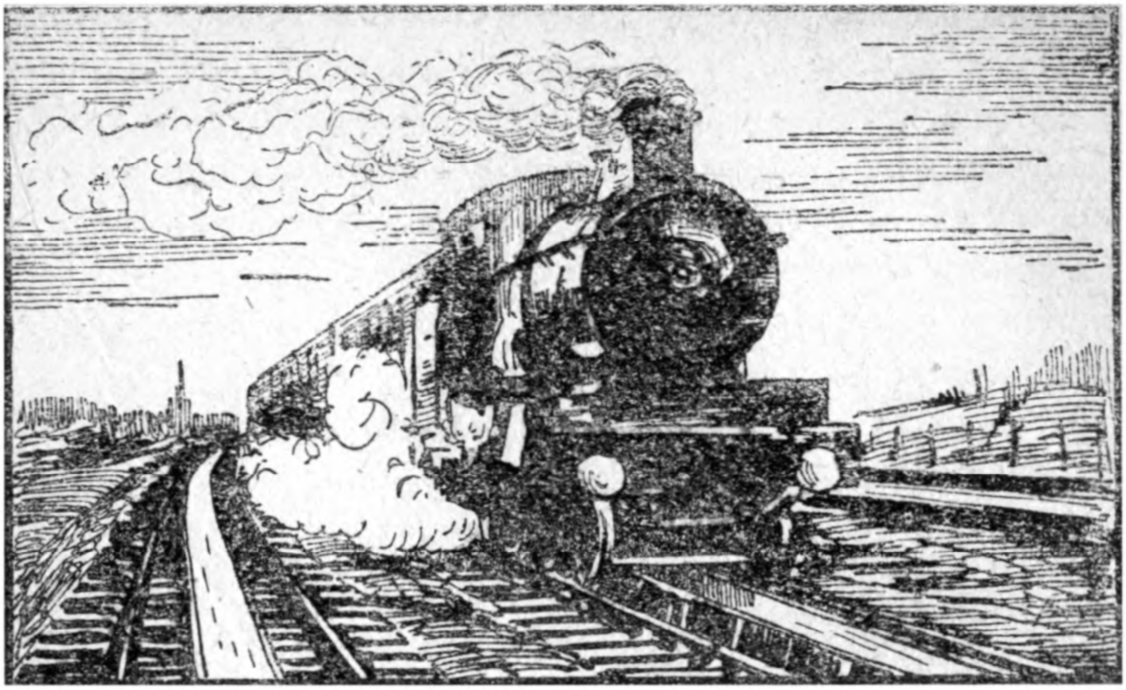


Рис. 1. Как паровозы на полном ходу набирают воду. Между рельсами устроен длинный водоем, в который погружается из тендера труба (текст—см. стр. 16).

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

### ЗАДАЧА О ДВУХ ЯЙЦАХ

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

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

„Скорлупа яйца,—пояснялось в журнале,—имеет кривую форму, при чем давление, приложенное при ударе к неподвижному яйцу, действует на его скорлупу снаружи; а мы знаем, 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 мною в распространенной ленинградской газете, решения поступили крайне разнообразные. Одни доказывали, что разбиться должно непременно ударяющее яйцо; другие—что именно оно-то 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 признаку 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 види-

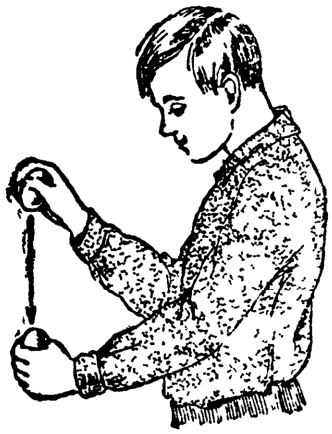


Рис. 2. Которое из ударяющихся яиц проломится?

мые звезды тоже движутся, и вся их совокупность, Млечный Путь, перемещается по отношению к иным звездным скоплениям.

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

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

## ПУТЕШЕСТВИЕ НА ДЕРЕВЯННОМ КОНЕ

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

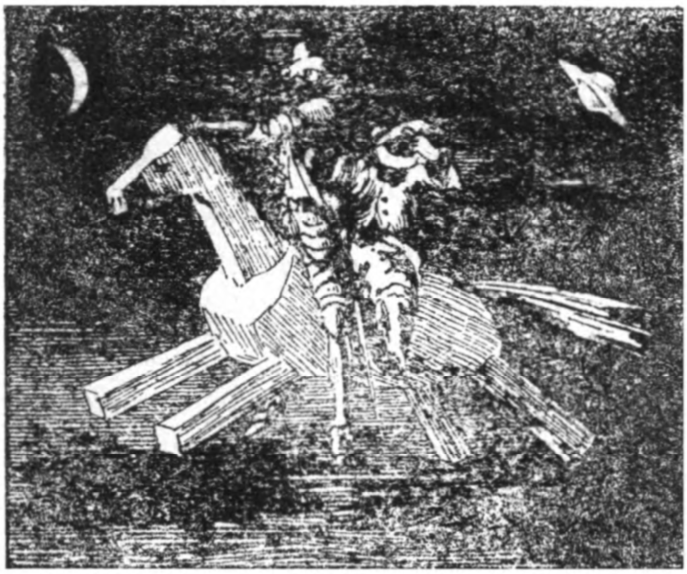


Рис. 3. Воображаемый полет на деревянном коне.

„— 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". Дон-Кихот заявил оруженосцу:

„— Готов клясться, что во всю жизнь мою я не ездил на коне с более спокойной поступью. Все идет, как должно итти, и ветер дует.

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

„Так на самом деле и было, потому что на него дули из нескольких больших мехов".

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

## ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ И МЕХАНИКА

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

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

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

Чтобы убедить тех, кто еще сомневается в законности взаимной замены „покоя" и „движения", приведу слова одного из немногих противников учения Эйнштейна,—проф. Ленарда, которого нельзя заподозреть в увлечении идеей относительности. Вот что он пишет:

„Пока движение поезда остается вполне равномерным, нет никакой возможности определить, что именно находится в движении и что в покое: поезд или окрестность. Устройство материального мира таково, что всегда, во всякий данный момент исключает возможность абсолютного решения вопроса о наличии равномерного движения или покоя и оставляет место только для изучения равномерного движения тел относительно друг друга, так как участие наблюдателя в равномерном движении совершенно 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 на друга свое оружие. Поставлены ли оба противника в строго одинаковые условия? Не в праве ли стрелок, стоящий спиной к носу корабля, жаловаться на то, что пущенная им пуля полетит медленнее, чем пуля противника?

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

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

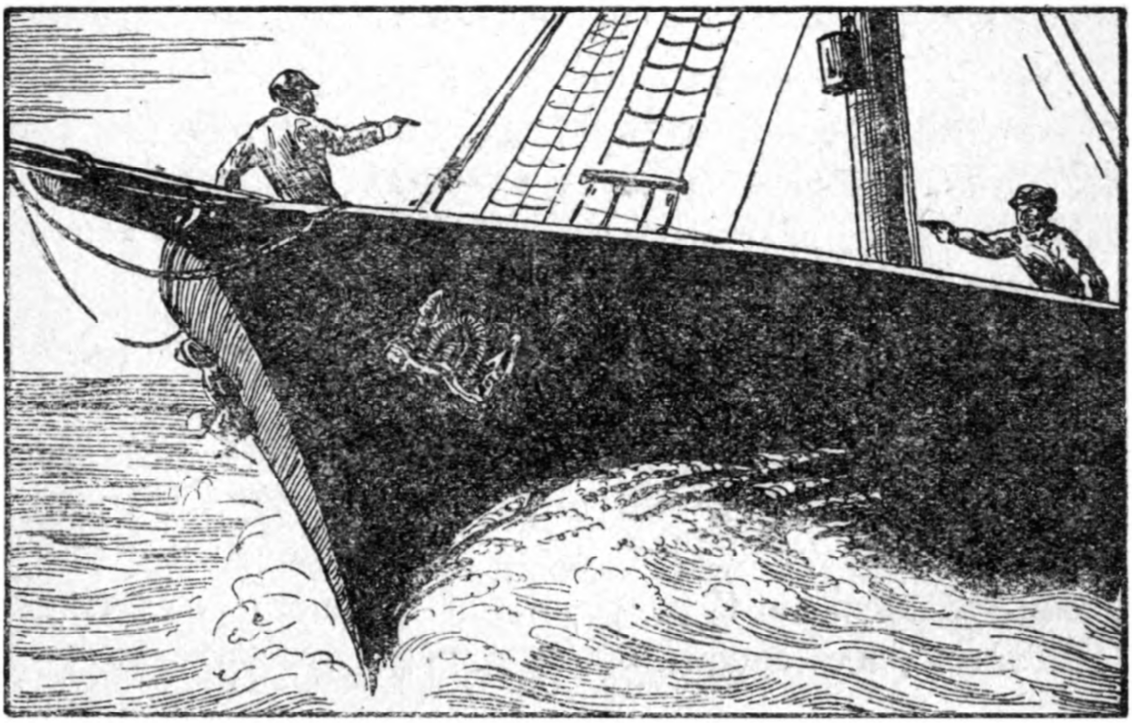


Рис. 4. Чья пуля раньше достигнет противника?

Здесь уместно будет привести отрывок из той книги Галилея, где классический принцип относительности был впервые высказан (книга эта, к слову сказать, 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 бо́льших прыжков к корме, чем к носу корабля,—хотя пока вы находитесь в воздухе, пол под вами бежит к части, противоположной прыжку. Бросая вещь товарищу, вам не нужно с бо́льшею силою кидать ее от кормы к носу, чем наоборот... Мухи будут летать во все стороны, не держась преимущественно той стороны, которая ближе к корме...“ и т. д.

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

Закон говорит только о движениях, а не о физических явлениях вообще. Если вы вооружите наших воображаемых стрелков не револьверами, а, например, источниками лучей света, то поставите перед физиками задачу о движении луча света в перемещающейся системе. Задача эта разрешается учением Эйнштейна („частный“, или специальный, принцип относительности).

## АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА

На практике иной раз оказывается чрезвычайно полезным заменять движение покоем и покой движением, опираясь на классический принцип относительности. При ручной распиловке бревна на доски пиле дается движение вдоль неподвижно лежащего бревна; на лесопильном же станке, наоборот, бревно надвигается на пилу, которая продольного движения не имеет. Чтобы изучить, как действует на самолет или на автомобиль сопротивление воздуха, сквозь который они движутся, обычно исследуют „обращенное“ явление: действие движущегося потока воздуха на покоящийся самолет. В лаборатории устанавливают широкую „аэродинамическую“ трубу (рис. 5), устраивают в ней ток воздуха и изучают его действие на неподвижно подвешенную модель аэроплана или автомобиля. Добытые результаты

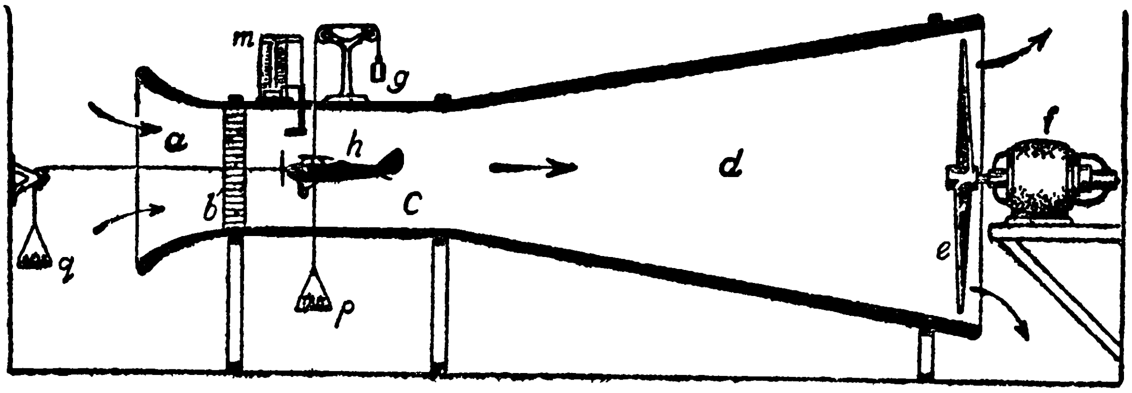



Рис. 5. Аэродинамическая труба ЦАГИ в разрезе. Воздух засасывается в трубу пропеллером *e* через решетку *b* (*f*—электродвигатель). Действие тока воздуха на аэроплан изучается помощью приборов *p*, *g*, *m*. Подвес *q*—так наз. аэродинамические весы—уравновешивает давление воздушного потока.

непосредственно прилагают к практике, хотя мы привыкли думать, что в действительности явление протекает как раз наоборот: воздух неподвижен, а аэроплан или автомобиль прорезают его с большой скоростью.

Читателю будет интересно узнать, что одна из величайших в мире аэродинамических труб устроена у нас в Москве, в Центральном аэро-гидродинамическом институте (сокращенное обозначение: ЦАГИ). Она имеет восьмиугольную форму; длина ее 50 метров, а поперечник в рабочей части—6 метров. Благодаря таким размерам, в ней умещается не уменьшенная лишь модель, а корпус настоящего аэроплана с пропеллером или целый автомобиль в натуральную величину.

## НА ПОЛНОМ ХОДУ ПОЕЗДА

Другой пример плодотворного применения классического принципа относительности возьмем из заграничной железнодорожной практики. В Англии и в Америке тендер нередко пополняется водой на полном ходу поезда. Достигается это остроумным „обращением“

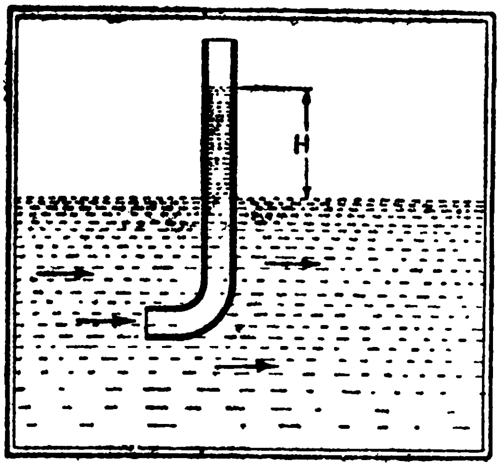



Рис. 6. Труба Пито. При погружении в текучую воду уровень в трубе поднимается выше, чем в водоеме.

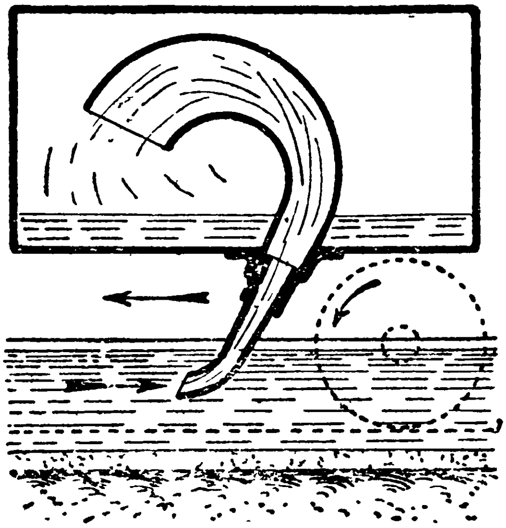


Рис. 7. Применение трубы Пито для набора воды в тендер движущегося поезда (см. рис. 1).

одного общественного механического явления. Мы знаем, что если в поток воды погрузить отвесно трубку, нижний конец которой загнут против течения (рис. 6), 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. Инженеры „обратили“ это явление: они двигают загнутую трубку в стоячей воде,—и вода в трубке поднимается выше уровня водоема. Движение заменяют покоем, а покой—движением.

Осуществляют это так, что на станции, где тендер паровоза должен, не останавливаясь, запастись водой, устраивают между рельсами длинный водоем в виде канавы (рис. 1). А с тендера спускают изогнутую трубу, обращенную отверстием в сторону движения. Вода, поднимаясь в трубе, подается в тендер быстро мчащегося поезда (рис. 7).

Как высоко может быть поднята вода этим оригинальным способом? По законам той отрасли механики, которая носит название „гидравлики" и занимается жидкостями, вода в трубке Пито должна подняться на такую же высоту, на какую взлетело бы вверх тело, подброшенное отвесно со скоростью течения воды, а эта высота ($H$) определяется формулой.

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

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

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

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

## КОПЕРНИК И ПТОЛЕМЕЙ

У читателя, без сомнения, уже родился вопрос: как же надо с точки зрения классического принципа относительности разрешать спор Коперника и Птолемея о движении Земли? Хотя речь идет не о прямолинейном движении и, следовательно, вопрос попадает в область

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

учений Эйнштейна, мы все же не оставим его здесь без рассмотрения.

Итак,—что вокруг чего обращается: [1] Земля вокруг Солнца, или Солнце вокруг Земли?

Такая постановка вопроса неправильна. Спрашивать, какое из двух указанных движений совершается „в действительности", — бессмысленно: тело может двигаться лишь по отношению к другому телу; двигаться же безотносительно — нельзя. Поэтому на поставленный вопрос надо ответить следующим образом: Земля и Солнце движутся одно относительно другого так, что при наблюдении с Земли Солнце кажется обращающимся вокруг Земли, а при наблюдении с Солнца — Земля кажется обращающейся вокруг Солнца. Единственно правильной для всех и всегда обязательной точки зрения нет.

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

Вы согласитесь с этим, если вспомните, что ни один астроном, не исключая и самого Коперника, не отказывался от „птолемеевского" выражения: „Солнце восходит" и не заменял его коперниковским: „Земля в своем

---

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

вращательном движении подставляет Солнцу то место, в котором я нахожусь". Для определения времени дня воззрение Птолемея удобнее Коперникова, и мы без колебания становимся в этом случае на точку зрения древнего грека. Кто вздумал бы описывать солнечный восход в терминах учения Коперника, тот не сразу был бы понят даже самым убежденным коперниканцем.

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

## КАК НАДО ПОНИМАТЬ ЗАКОН ИНЕРЦИИ

То, о чем мы так пространно сейчас беседовали, составляет в сущности следствие одного лишь закона механики, закона независимости действия силы. Кратко он формулируется так:

> действие силы на тело не зависит от того, находится ли тело в покое, или движется.

Это так называемый „второй" из тех трех законов, которые положены Ньютоном в основу всей механики. Первый — закон инерции; третий — закон противодействия. Уделив столько места второму закону, остановимся теперь на остальных двух.

Значение закона инерции картинно представлено английским физиком Р. Боллом в следующих строках его „Опытной механики“: „Будь устранена инерция — уничтожился бы грохот сражений, потому что снаряды оказались бы безвредными, удары — недействительными. Столкновения поездов стали бы безопасны; взрывы — бессильны. Но эти выгоды куплены были бы дорогой ценой, потому что при отсутствии инерции Луна упала бы на Землю, а Земля обрушилась бы на Солнце“.

Закон инерции, хотя и противоречит привычным представлениям, наиболее понятен из всех трех. И однако, иные понимают его совершенно превратно. Именно, его формулируют нередко, как свойство тел „сохранять свое состояние, пока внешняя причина ненарушит этого состояния“. Такое распространительное 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 какая-либо причина не выведет его из такого состояния; причина эта называется силой.

Значит, каждый раз, когда тело

1) приходит в движение;

2) меняет свое прямолинейное движение на не-прямолинейное;

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

Если же ни одной из этих перемен в движении не наблюдается, то на тело никакая сила не действует, как бы стремительно оно ни двигалось. Надо твердо помнить, что тело, движущееся равномерно и прямолинейно, не находится вовсе под действием силы (или же действующие на него силы уравновешиваются). Оно было раньше, конечно, приведено в движение силой; но сейчас сила на него уже не действует. В этом существенное отличие современных механических представлений от взглядов мыслителей древности и средних веков (до Галилея). В этом же пункте расходятся обыденное мышление и научное мышление.

Сказанное объясняет нам, между прочим, почему трение в механике рассматривается как сила, хотя никакого движения оно вызвать не может. Трение есть сила потому, что оно замедляет движение. Такие силы, которые сами не могут породить движения, а способны лишь замедлять уже возникшее движение (или уравновешивать другие силы), называются „пассивными",—в отличие от сил движущих, или „активных".

Полезно отметить еще одно обстоятельство. Говоря об инерции, часто определяют ее (следуя старине) как „стремление тела сохранять состояние покоя" и т. д. С таким оборотом речи мы встречаемся в большинстве учебных и популярных книг, хотя Ньютон формулирует закон инерции иначе: „Каждое тело пребывает в своем состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, поскольку действующие на тело силы не принуждают его изменить такое состояние". Тела вовсе не стремятся оставаться в покое, они просто остаются в покое. Разница тут та же, что и 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 отнюдь 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“ неуместно еще и потому, что, выведенное из состояния покоя, тело само собою к нему не возвращается, а напротив, сохраняет навсегда сообщенное ему движение (при отсутствии, конечно, сил, мешающих движению).

Не малая доля тех недоразумений, которые связаны с законом инерции, обусловлена этим неосторожным словом „стремится“, вкравшимся в большинство учебников физики и механики.

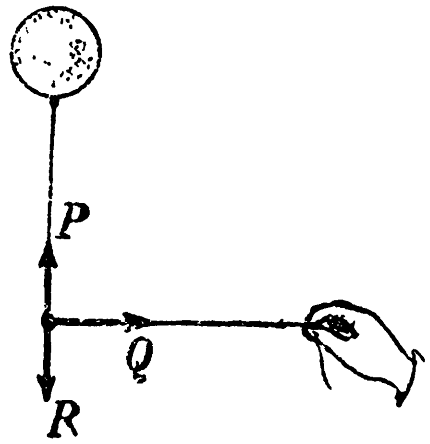
Не меньше трудностей для правильного понимания представляет **третий** закон Ньютона, к рассмотрению которого мы сейчас и переходим.

## ДВА КОНЦА КАЖДОЙ СИЛЫ

Желая открыть дверь, вы тянете ее за ручку к себе. Мышца вашей руки, сокращаясь, сближает свои концы; она с одинаковой силой влечет друг к другу дверь и ваше туловище. В этом случае до наглядности ясно, что между вашим телом и дверью действует сила, приложенная одним концом к двери, другим—к вашему телу. То же самое, разумеется, происходит и в случае, когда дверь открывается не на вас, а от вас: сила **расталкивает** дверь и ваше тело.

То, что мы наблюдаем здесь для силы мускульной, верно для всякой силы вообще, безразлично, какой она природы. Каждая сила непременно имеет, выражаясь образно, два конца: один приложен к телу, на которое, как мы говорим, сила действует; другой приложен к телу, которое мы называем действующим. Сказанное принято выражать в механике коротко — слишком коротко для ясного понимания — так: „действие равно противодействию“.

Смысл закона противодействия в том, что все силы природы — силы **п а р н ы е**: в каждом случае проявления какой-либо силы вы должны представлять себе, что перед вами лишь один ее „конец“ и что существует другой, приложенный где-нибудь в ином месте. Каждая сила действует непременно между двумя точками, стремясь их сблизить или растолкать. Нет сил притягивающих, сил отталкивающих, а есть лишь силы, стягивающие две точки или расталкивающие их.




Пусть вы рассматриваете (черт. 8) силы P, $Q$ и $R$, которые действуют на гру-

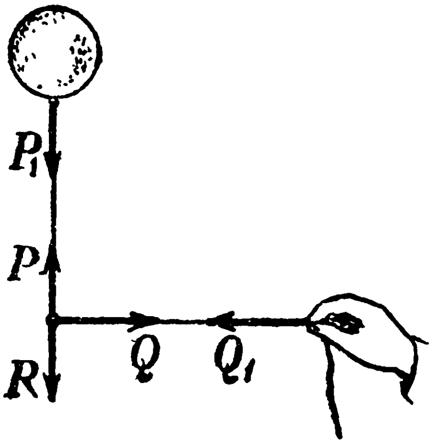



Рис. 8. Силы ($P$, $Q$, $R$), действующие на грузик детского воздушного шара. Где силы противодействующие?


Рис. 9. Ответ на вопрос предыдущего рисунка. $P_1$, $Q_1$, $R_1$ — силы противодействующие.

зик, подвешенный к детскому воздушному шару. Тяга $P$ шара, тяга $Q$ веревочки и вес $R$ грузика — силы как будто одиночные. Но это лишь отвлечение от действительности: на самом деле все три силы представляют „концы“ двусторонне действующих сил, имеющих каждая свой другой конец. А именно: противоположный конец силы $P$ приложен к воздушному шарику (рис. 9, сила $P_1$); второй конец силы $Q$ действует на руку ($Q_1$); другой же конец силы $R$ приложен в центре земного шара (сила $R_1$), потому что грузик не только притягивается землей, но и сам ее притягивает.

Еще одно существенное замечание. Величина того двустороннего напряжения, „концы“ которого мы рассматриваем как две самостоятельные силы, равна величине каждой из этих концевых сил. Забывая об этом, впадают нередко в грубые ошибки, примеры которых мы сейчас приведем.

## ЗАДАЧА О ДВУХ ЛОШАДЯХ

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

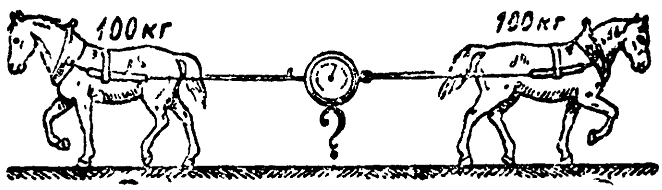



Рис. 10. Сколько показывает пружинный безмен?

### Решение

Многие отвечают: 100+100=200 кило. Ответ неверен. Силы по 100 кг, с какими тянут лошади, — не что иное, как „концы“ одного и того же напряжения, равного — согласно сейчас сказанному — не 200, а только 100 кг.

Поэтому, между прочим, когда Магдебургские полушария растягивались 8 лошадьми в одну сторону и 8 в противоположную, то не следует думать, что они растягивались силою 16 лошадей.

## ЗАДАЧА О ДВУХ ЛОДКАХ

К пристани на озере приближаются две одинаковых лодки. Оба лодочника подтягиваются помощью веревки. Противоположный конец веревки первой лодки привязан

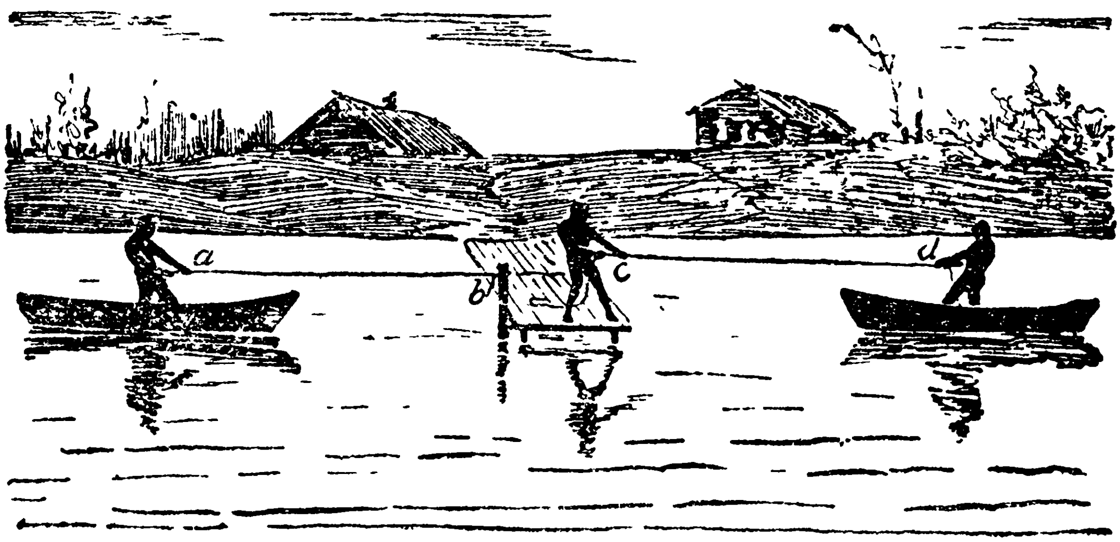



Рис. 11. Которая из лодок причалит раньше?

к тумбе на пристани; противоположный же конец веревки второй лодки находится в руках матроса на пристани, который также тянет веревку к себе. Все трое прилагают одинаковые усилия.

Какая лодка причалит раньше?

### Решение

На первый взгляд может показаться, что причалит раньше та лодка, которую тянут двое: двойная сила порождает большую скорость. Но верно ли, что на эту лодку действует **двойная** сила? Если и лодочник и матрос оба тянут к себе веревку, то натяжение веревки равно силе только одного из них,—иначе говоря, оно таково же, как и для первой лодки. Обе лодки подтягиваются с равною силою и причалят одновременно. [1]

## ЗАГАДКА ПЕШЕХОДА И ПАРОВОЗА

Бывают случаи,—на практике не редкие,—когда оба „конца" силы приложены в разных местах одного и того же тела. Мускульное напряжение или давление пара в цилиндре паровоза представляют примеры таких сил, называемых „внутренними". Особенность их та, что они могут изменять взаимное расположение частей тела, насколько это допускает связь частей, но никак не могут сообщить всем частям тела одно общее движение. При выстреле из ружья давление пороховых газов одним своим „концом" выбрасывает пулю вперед, другим же „концом" сила эта сообщает ружью движение назад.

---

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

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

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

двигать вперед и пулю и ружье давление пороховых газов, как сила внутренняя, не может.

Но если внутренние силы неспособны перемещать **все** тело, то как же движется пешеход? Как движется паровоз? Сказать, что пешеходу помогает трение ног о землю, а паровозу трение колес о рельсы, — не значит еще разрешить загадку. Трение, конечно, совершенно необходимо для движения пешехода и паровоза: хорошо известно, что нельзя ходить по очень скользкому льду и что паровоз на скользких рельсах вращает колесами, не двигаясь с места. Но известно и то, что трение — сила **пассивная** (стр. 21), неспособная сама по себе порождать движение.

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

Загадка разрешается довольно просто. Оба „конца" внутренней силы, действуя одновременно, не могут сообщить телу движение, так как действие одного конца уравновешивается действием другого. Но что будет, если некоторая третья сила уравновесит или ослабит действие одного из двух „концов" внутренней силы? Тогда ничто не помешает другому концу своим избытком двигать тело. Трение и есть та третья сила, которая ослабляет действие одного из концов внутренней силы и тем дает другому концу возможность двигать тело.

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

$$F_1, \ -F_2, \ F_3$$

силы $-F_2$ и $F_3$ полностью или частью уравновешиваются, и тогда сила $F_1$ становится действующей. Инженеры, описывая движение паровоза, предпочитают говорить, — не вполне последовательно, — что уравновешиваются силы $F_1$ и $-F_2$, а движет паровоз сила трения $F_3$. Практически это, впрочем, безразлично, поскольку для движения паровоза необходимо участие и силы пара и силы трения. [1]

[1] Тем не менее вопрос этот служит нередко предметом горячих и довольно бесплодных споров. Мне пришлось однажды, по приглашению Бюро жалоб, участвовать в разборе подобного спора, дошедшего до РКИ.

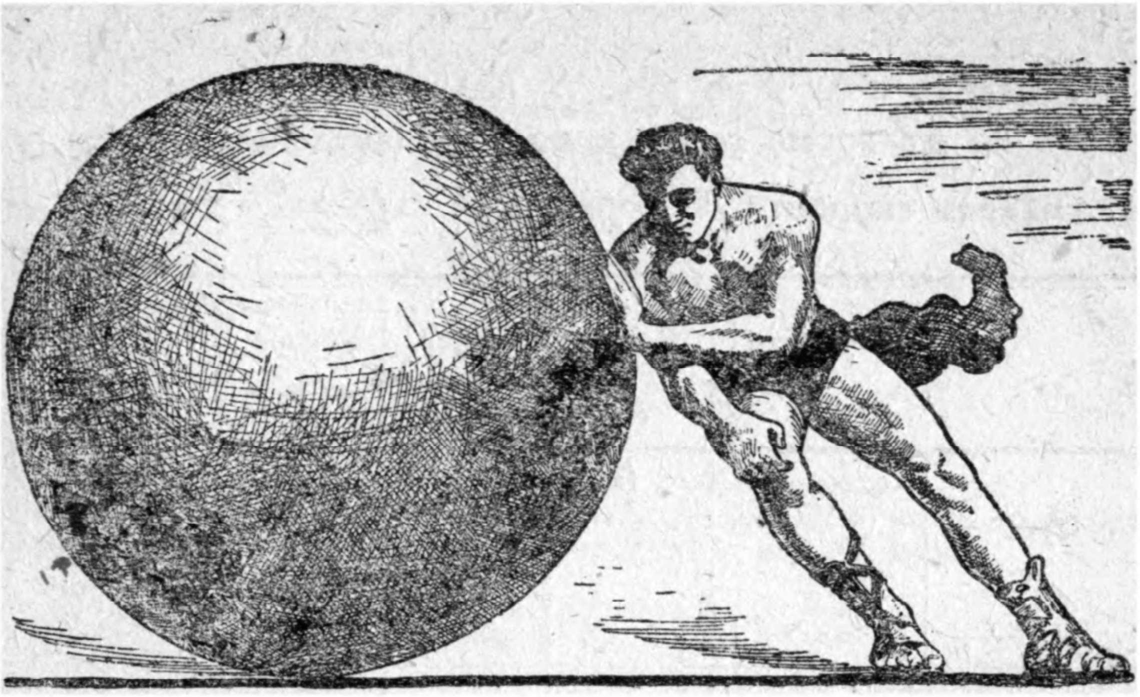


Рис. 12. Мог ли бы человек сдвинуть земной шар? (См. стр. 38)

## ГЛАВА ВТОРАЯ

# СИЛА И ДВИЖЕНИЕ

### СПРАВОЧНАЯ ТАБЛИЦА ПО МЕХАНИКЕ

В этой книге не раз придется нам обращаться к формулам из механики. Для тех, кем соотношения эти забыты, дана здесь небольшая табличка-справочник, помогающая восстановить 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; таблица дает лишь конечные результаты.)

На нескольких примерах покажем, как пользоваться табличкой.

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

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

| | Скорость $v$ | Время $t$ | Масса $m$ | Ускорение $a$ | Сила $f$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Путь $S$ | — | — | — | $\frac{v^2}{2}$ | Работа $A = \frac{mv^2}{2}$ |
| Скорость $v$ | $2aS$ | Путь $S$ | Импульс $ft$ | — | Мощность $W = \frac{A}{t}$ |
| Время $t$ | Путь $S$ | — | — | Скорость $v$ | Количество движения $mv$ |
| Масса $m$ | Импульс $ft$ | — | — | Сила $f$ | — |

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

Скорость $v$, 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 $m$ (формулы $a = \frac{f}{m}$ и $m = \frac{f}{a}$).

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

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

а затем и формулу

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

Среди них ищете ту, которая отвечает условиям задачи.

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

$$\begin{aligned} fS&=A \quad \text{(работа)}\\ fv&=W \quad \text{(мощность)}\\ ft&=mv \quad \text{(количество движения)}\\ f&=ma \end{aligned}$$

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

Излишне пояснять смысл пустых клеток таблицы: они показывают, что произведения соответствующих величин не имеют в механике никакого смысла.

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

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

Уменью выбирать единицы мер и безошибочно определять, в каких мерах получился результат, нельзя научиться в четверть часа. Кто этим уменьем не обладает, тому следует во всех случаях пользоваться мерами системы „сантиметр—грамм—секунда", а полученный результат, если нужно, укрупнять.

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

## ОТДАЧА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ

В качестве примера применения таблицы стр. 30 рассмотрим „отдачу“ ружья.. Пороховые газы, выбрасывающие своим напором пулю в одну сторону, отбрасывают в то же время и ружье в обратную сторону, порождая всем известную „отдачу“. С какою скоростью движется отдающее ружье? Вспомним, что действие пороховых газов на ружье есть лишь другой конец силы, выбрасывающей пулю. Обе силы равны и действует одинаковое

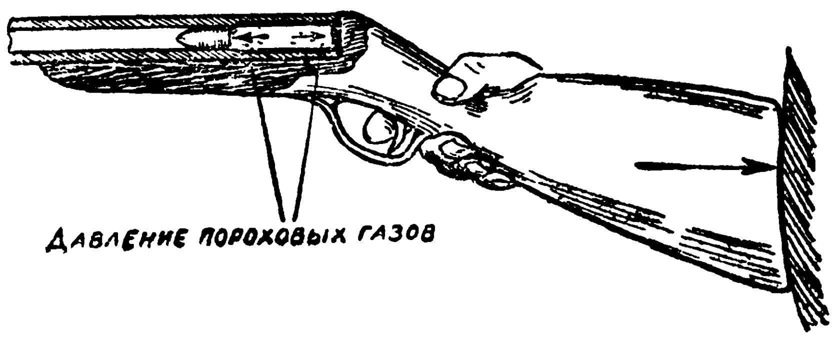



Рис. 13. Почему ружье отдает?

время. Заглянув в таблицу, находим, что произведение силы ($f$) на время ($t$) равно „количеству движения“ $mv$, т. е. произведению массы $m$ на ее скорость $v$:

$$ft = mv.$$

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

$$mv = Mw$$

откуда:

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

Поставим в эту пропорцию числовые значения ее членов. Масса пули нашей военной винтовки—9,6 г, скорость ее при вылете—880 метров в сек.; масса винтовки—4500 г. Значит,

$$\frac{w}{880} = \frac{9,6}{4,500}$$

Следовательно, скорость ружья $w = 1,9$ метра. Нетрудно вычислить, что отдающее ружье несет с собою в 470 раз меньшую „живую силу" $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$, нежели пуля; это значит, что разрушительная энергия ружья в 470 раз меньше, нежели пули. Неумелого стрелка отдача может все же опрокинуть и даже поранить.

Для нашей полевой скорострельной пушки, весящей 2000 кг и выбрасывающей 6-килограммовые снаряды со скоростью 600 метров в секунду, скорость отдачи примерно такая же, как и у винтовки—1,8 метра. Но при значительной массе орудия, энергия этого движения в 450 раз больше, чем для винтовки, и почти равна энергии ружейной пули в момент ее вылета. Старинные пушки откатывались отдачей с места назад. В современных орудиях скользит назад только ствол, лафет же остается неподвижным, удерживаемый упором („сошником") на конце хобота. Морские орудия (не вся орудийная установка) при выстреле откатываются назад, но, благодаря особому приспособлению, после отката сами возвращаются на прежнее место.

## ЗНАНИЕ ОБИХОДНОЕ И НАУЧНОЕ

При изучении механики поражает то, что во многих весьма простых случаях наука эта резко расходится с обиходными представлениями. Вот показательный пример. Как должно двигаться тело, на которое неизменно действует одна и та же сила? „Здравый смысл" подсказывает, что такое тело должно двигаться все время с одинаковою 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.

Механика утверждает, однако, совершенно другое. Она учит, что постоянная сила порождает движение не равномерное, а ускоренное,—так как к скорости, ранее накопленной, сила непрерывно добавляет новую. При равномерном же движении тело вовсе не находится под действием силы,—иначе оно двигалось бы неравномерно (ср. стр. 21).

Неужели же обиходные наблюдения так грубо ошибочны?

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

Мы видим, в чем погрешает обиходная механика: ее утверждения почерпнуты из недостаточного материала. Научные обобщения имеют более широкую базу. Законы научной механики выведены из движения не только телег и паровозов, но также планет и комет. Чтобы делать правильные обобщения, надо расширить горизонт наблюдений и очистить факты от случайных обстоятельств. Только так добытое 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 ускорения. Это важное соотношение, к сожалению, смутно усваивается при школьном прохождении механики. Ради лучшего выделения сущности явления примеры взяты в фантастической обстановке.

### ПУШКА НА ЛУНЕ

(Задача)

Современное артиллерийское орудие сообщает снаряду начальную скорость 900 метров в секунду. Перенесите его мысленно на Луну, где все тела становятся в 6 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 взрыва на Земле и на Луне одинакова, а действовать приходится там на вшестеро более легкий снаряд, то сообщенная скорость должна быть в 6 раз больше, чем на Земле: $900 \times 6 = 5400$ метров. Снаряд будто бы вылетит на Луне со скоростью 5,4 километра в секунду.

Подобный ответ, при кажущемся его правдоподобии, совершенно неверен.

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

Итак, пушка на Луне выбросила бы снаряд точно с такою же начальною скоростью, как и на Земле. Другое дело, как далеко или как высоко залетел бы на Луне этот снаряд. Здесь ослабление тяжести уже имеет существенное значение.

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

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

которую мы находим в справочной табличке стр. 30. Так как ускорение на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле, т. е. $v = g/6$, 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, пушка на Луне закинула бы ядро в 6 раз выше, чем на Земле (в несопротивляющейся атмосфере), несмотря на то, что начальная скорость снаряда в обоих случаях одинакова.

## НАГАН НА ДНЕ ОКЕАНА

Для этой задачи взята также необычная обстановка: дно океана. Глубочайшее место океана, какое до сих пор удалось измерить, находится близ Филиппинских островов: 10 700 метров.

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

Вот сведения о нагане, необходимые для решения задачи. Длина ствола—22 см. Скорость пули при выходе из дула — 270 метров в сек. Калибр — диаметр канала—7 мм. Вес пули—7 граммов.

Итак, выстрелит ли наган на дне океана?

### Решение

Задача сводится к решению вопроса: какое давление на пулю больше—пороховых газов изнутри или воды океана снаружи? Последнее рассчитать несложно: каждые 10 метров водяного столба давят с силою одной атмосферы, т. е. 1 кг на кв. см. Следовательно, 11 700 метров водяного столба окажут давление в 1170 атмосфер или больше тонны на кв. см.

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

$$v^2 = 2aS,$$

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

$$27000^2 = 2a \times 22,$$

откуда ускорение $a = 16\,600\,000$ см $= 166$ км.

Огромная величина ускорения (среднего)—166 километров в секунду за секунду—не должна нас удивлять: ведь пуля проходит путь по каналу нагана в ничтожный промежуток времени,—который заодно тоже поучительно вычислить. Расчет выполняем по формуле $v = at$:

$$27\,000 = 16\,600\,000t.$$

откуда время

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

Мы видим, что за 600-ю долю секунды скорость пули должна возрасти от нуля до 270 метров. Ясно, что для целой секунды прибавка скорости, так стремительно нарастающей, должна быть огромна.

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

$$7 \times 16\,600\,000 = 116\,200\,000 \text{ дин.}$$

В килограмме круглым счетом миллион дин (дина — около миллиграмма); значит, на пулю действует сила в 116 кг. Чтобы вычислить давление в килограммах на кв. см, надо знать, по какой площади эта сила распределяется. Площадь равна поперечному сечению канала револьвера (диаметр канала 7 мм = 0,7 см):

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

Значит, на 1 кв. см приходится давление в

$$116 : 0{,}38 = 305 \text{ кг.}$$

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

## СДВИНУТЬ ЗЕМНОЙ ШАР

Даже среди людей, изучавших механику, распространено убеждение, что малою силою нельзя сдвинуть свободное тело, если оно обладает весьма большою массою. Это одно из заблуждений „здравого смысла“. Механика утверждает совершенно иное: всякая сила, даже самая маленькая, должна сообщить движение всякому телу, даже чудовищно грузному, если тело это **свободно**. Мы не раз уже пользовались формулой, в которой выражена эта мысль:

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

Последнее выражение говорит нам, что ускорение может быть равно нулю только в двух случаях: или тогда, когда сила $f$ равна нулю, или тогда, когда масса $m$ бесконечно велика. Но последний случай не реален; значит, в действительности всякая сила должна заставить двигаться любое свободное тело.

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

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

Но вот вопрос: какова будет быстрота этого движения? Мы знаем, что ускорение, приобретаемое телом под действием данной силы, тем меньше, чем больше масса тела. Если деревянному крокетному шару мы можем силою своих рук сообщить ускорение в несколько десятков метров в сек. за секунду, то земной шар, масса которого неизмеримо больше, получит от такой же силы неизмеримо меньшее ускорение. Мы говорим: „неизмеримо больше“, „неизмеримо меньше“, конечно, не в буквальном смысле. Измерить массу земного шара возможно, [1] а следовательно, возможно определить и его ускорение при заданных условиях. Сделаем это.

Пусть сила, с какой человек напирает на земной шар, [2] равна 10 килограммам, около 10 000 000 дин. Мы рискуем запутаться в выкладках, если не прибегнем к здесь сокращенному обозначению подобных чисел: $10\,000\,000 = 10^7$. Масса земного шара равна $6 \times 10^{27}$ граммов. Поэтому величина искомого ускорения

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

Такова величина ускорения, приобретаемого в этом случае земным шаром. На сколько же сдвинется планета в столь медленно ускоряющемся движении? Это зависит от продолжительности движения. И без расчета ясно, что за какой-нибудь час или сутки перемещение будет слишком ничтожно. Возьмем крупный интервал—год, т. е. круглым счетом 32 миллиона секунд ($32 \times 10^6$). Путь $S$, проходимый в $t$ секунд при ускорении $a$, равен (см. справочную табличку стр. 30)

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

---

[1] См. об этом в „Занимательной астрономии“ статью „Как взвесили Землю“.

[2] Не следует думать, что человек, лишенный опоры, не может оказать на земной шар никакого действия, а будет лишь отталкиваться от него: по закону противодействия, сила, действующая на земной шар, равна силе, отталкивающей тело человека.

В данном случае

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

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

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

Это — приблизительно толщина человеческого волоса.

Результат поразительный: человек силою своих мышц может в течение жизни сдвинуть земной шар на толщину волоса! Действие, как хотите, довольно значительное для такого пигмея, как человек.

Самое удивительное то, что расчет наш ничуть не фантастичен, как можно думать. Мы действительно сдвигаем земной шар силою наших мускулов! Всякий раз, когда мы взваливаем на плечи груз, мы надавливаем ногами на Землю и заставляем ее подаваться — пусть на ничтожную величину — под действием этой силы. Мы совершаем подобные подвиги на каждом шагу — буквально на каждом шагу, потому что при ходьбе неизбежно отталкиваем ногой нашу планету. Ежесекундно заставляем мы земной шар делать эти сверхмикроскопические перемещения, прибавляя их к тем астрономическим движениям, которыми он обладает.

## ЛОЖНЫЙ ПУТЬ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСТВА

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

Упомянутый закон утверждает, что движение центра тяжести тела (или системы тел) не может быть изменено действием одних лишь внутренних сил. Если летящая бомба разрывается, то, пока образовавшиеся осколки не достигли земли, общий центр их тяжести продолжает двигаться по тому же пути, по которому двигался центр тяжести целой бомбы. В частном случае, если центр тяжести тела был первоначально в покое (т. е. если тело было неподвижно), то никакие внутренние силы не могут этого центра тяжести переместить.

Закон этот является прямым следствием закона действия и противодействия.

Понятно, почему внутренняя сила не может переместить тяжести тела (или изменить его первоначальное движение): действие двух равных противоположных сил уравновешивает друг друга.

К какого рода заблуждениям приводит изобретателей пренебрежение рассматриваемым законом, показывает следующий поучительный пример — проект летательной машины совершенно нового типа. Представим себе (черт. 14), — говорит изобретатель, — замкнутую трубу, состоящую из двух частей: прямой $AB$ и дугообразной $ACB$. В трубах имеется жидкость, которая непрерывно течет в одном направлении (течение поддерживается вращением винтов, размещенных в трубах). Течение жидкости в дугообразной части $ACB$ трубы сопровождается центробежным давлением на наружную стенку.

Получается усилие $P$ (черт. 15), направленное вверх,— усилие, которому не противодействует никакая другая сила, 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.

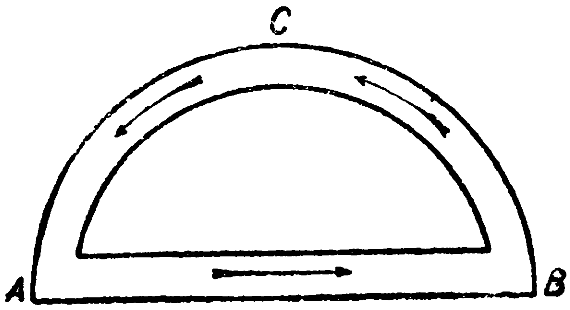



Рис. 14. Проект нового летательного аппарата.

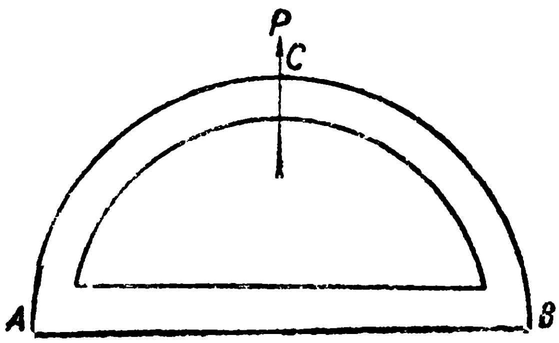



Рис. 15. Сила $P$ должна увлекать аппарат вверх.

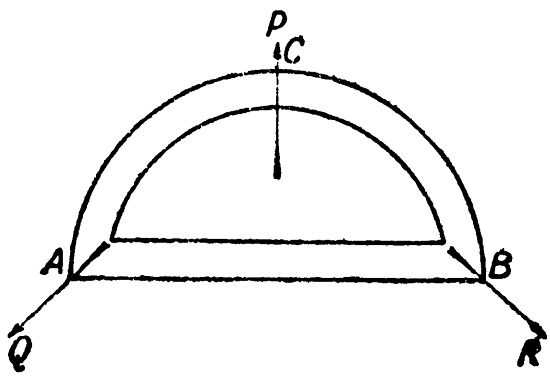



Рис. 16. Почему аппарат не поднимается.

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 они не могут. Единственная движущаяся часть системы — жидкость — при движении не меняет расположения своей массы; значит, центр тяжести ее тоже не перемещается. Следовательно, не может передвинуться и никакая другая часть аппарата, — иначе сместился бы центр тяжести всей системы. Итак, машина двигаться не должна. В рассуждении изобретателя кроется какая-то ошибка, какое-то существенное упущение.

Нетрудно указать, в чем именно заключается эта 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. 16). 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 центробежное действие сильнее. Вследствие этого на поворотах должны действовать еще две силы $Q$ и $R$, направленные наружу; равнодействующая этих двух сил направлена в н и з и уравновешивает силу $P$. Изобретатель проглядел эти силы. Но он, и не зная о них, мог бы понять непригодность своего проекта, если бы ему был известен закон движения центра тяжести.

## ГДЕ ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ ЛЕТЯЩЕЙ РАКЕТЫ?

Многих изобретателей смущает то, что молодое и многообещающее детище новейшей техники — ракетный двигатель — как будто нарушает закон движения центра тяжести. Звездоплаватели хотят заставить ракету долететь до Луны—долететь действием одних только внутренних сил. Но ведь ясно, что ракета унесет с собою 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 ч а с т ь ракеты: остальная часть — продукты горения—движется в противоположном направлении; поэтому центр тяжести всей системы остается там, где он был до старта ракеты. Теперь примем во внимание то обстоятельство, что вытекающие газы не движутся беспрепятственно, а ударяются о Землю. Тем самым в систему ракеты включается весь земной шар, и речь должна итти о сохранении центра тяжести системы Земля-ракета. Вследствие удара газовой струи о Землю (или об ее атмосферу) наша планета несколько смещается, центр тяжести ее отодвигается в сторону, противоположную движению ракеты. Масса земного шара настолько огромна по сравнению с массой ракеты, что самого ничтожного, практически неуловимого его перемещения оказывается достаточно для уравновешения того смещения центра тяжести системы Земля-ракета, которое обусловлено перелетом ракеты на расстояние Луны. Передвижение земного шара меньше расстояния до Луны во столько же раз, во сколько раз масса Земли больше массы ракеты (без заряда).

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

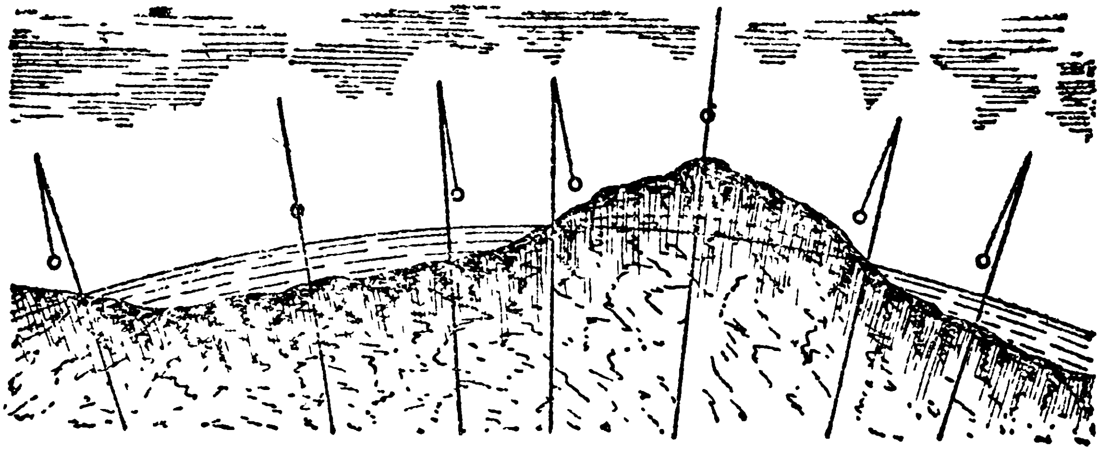


Рис. 17. Профиль земной поверхности и направления отвесов (схема—по А. В. Клоссовскому).

## 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 сделаны поистине сказочные достижения: человеку удалось, благодаря им, проникнуть мысленно в недра Земли, узнать, что делается на десятки и сотни километров под нашими ногами. Мы вполне оценим этот подвиг науки, если вспомним, что глубочайшая буровая скважина не длиннее 2 километров.

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

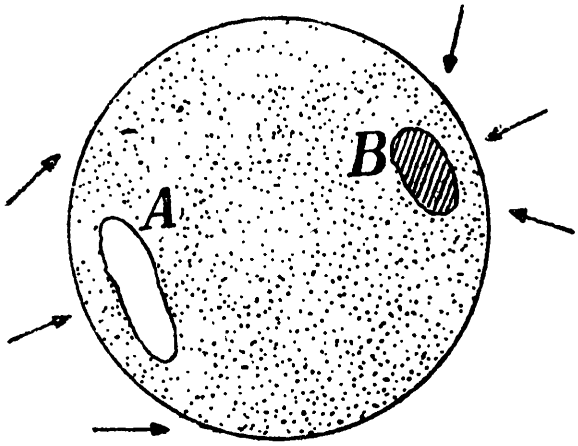


Рис. 18. Пустоты ($A$) и уплотнения ($B$) в толще земного шара отклоняют отвес (по Клоссовскому).

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

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

Если для исследования строения толщи Земли пользоваться „секундным" маятником, т. е. делающим одно колебание в секунду, то должно быть

$$\pi\sqrt{\frac{1}{g}} = 1, \text{ и } \frac{1}{g} = \frac{1}{\pi^2} = 0{,}101.$$

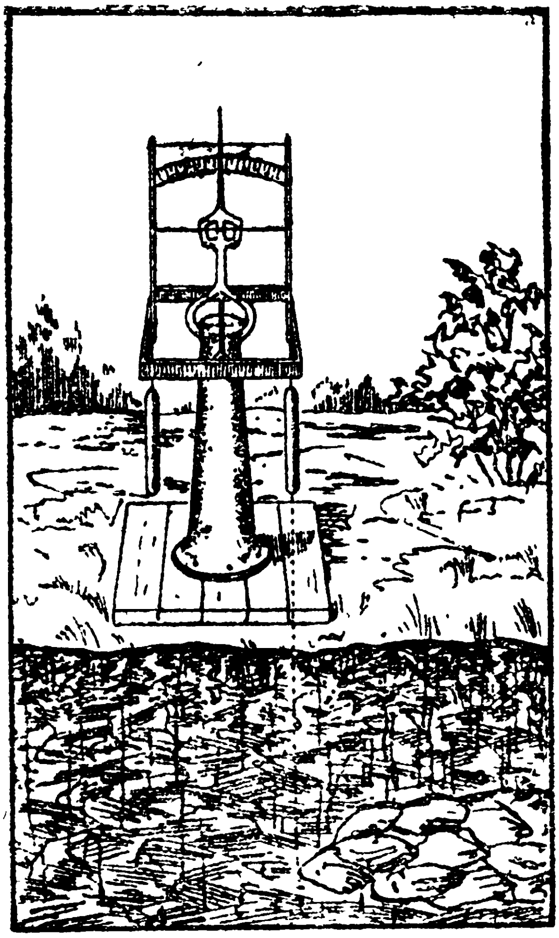


Рис. 19. Вариометр — чувствительный прибор для обнаружения притягательного действия масс внутри земной коры. Главная часть прибора—коромысло с грузами.

Ясно, что всякое изменение напряжения 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 его островах напряжение тяжести сильнее, чем близ берегов, а возле берегов—больше, чем вдали от них, на материке. О чем это говорит? О том, очевидно, что толща Земли под материками составлена из более легких веществ, чем под дном океанов. Из таких физических фактов геологи почерпают ценные указания для суждения о породах, слагающих толщу нашей планеты.

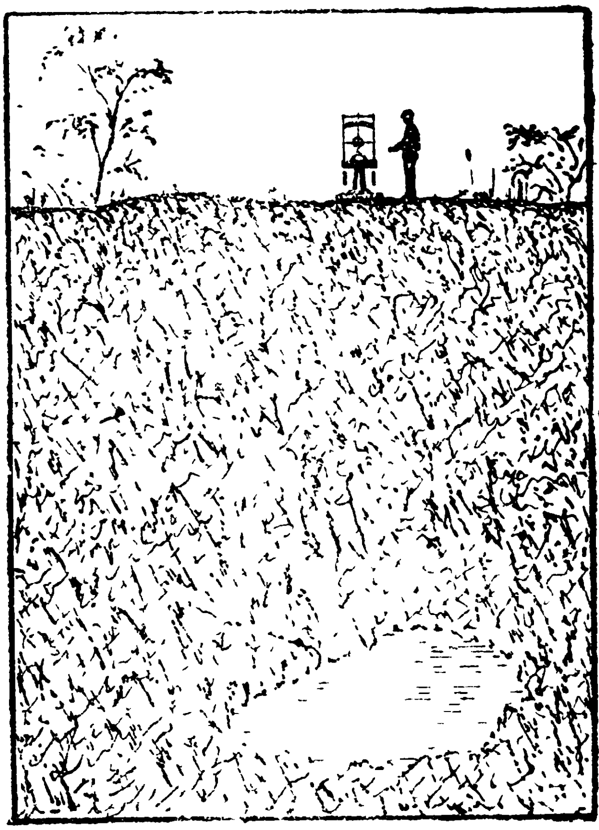


Рис. 20. Помощью вариометра открыты были залежи железной руды (Кривой рог), месторождения соли и платины (Урал), нефть (Баку), калийные соли (Соликамск).

Незаменимые услуги оказал подобный способ исследования при выявлении причин так наз. „Курской магнитной аномалии“. Вот несколько строк отчета одного из ее исследователей. [1]

„... Можно с полною определенностью утверждать о наличии под земною поверхностью значительных притягивающих масс, при чем граница этих масс

[1] Исследования в районе Курской аномалии производились не с отвесом, а с особыми крутильными весами (так наз. „вариометром“). Нить прибора закручивается под действием притяжения подземных масс. Точность показаний этого удивительного прибора равна одной биллионной доле грамма! Притяжение больших гор вариометр „чувствует“ на расстоянии 300 километров.

с западной стороны... устанавливается с совершенною отчетливостью. Вместе с тем представляется вероятным, что эти массы простираются преимущественно в восточном направлении, имея восточный скат более пологим, чем западный".

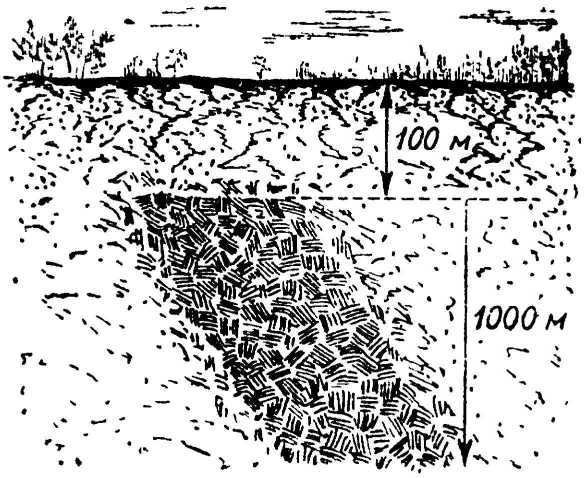



Рис. 21. Предполагаемая причина Курской аномалии: шток железной руды мощностью 1000 метров, залегающий на глубине 100 метров.

Приведу также некоторые результаты исследования аномалий (отклонений от нормы) силы тяжести на восточных склонах Урала, выполненного в 1930 г. ленинградскими астрономами:

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

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

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

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

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

## МАЯТНИК В ВОДЕ

(Задача)

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

Решение

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

Это загадочное на первый взгляд явление объясняется выталкивающим действием воды на погруженные в нее тела. Оно 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 напряжение тяжести слабее. Из формулы, приведенной в предыдущей статье, $t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ следует, что с уменьшением напряжения тяжести ($g$), время колебания ($t$) должно возрасти: маятник будет колебаться медленнее.

## НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

(Задача)

Сосуд с водой стоит на наклонной плоскости (рис. 22). 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, или же займет иное положение? Какое?

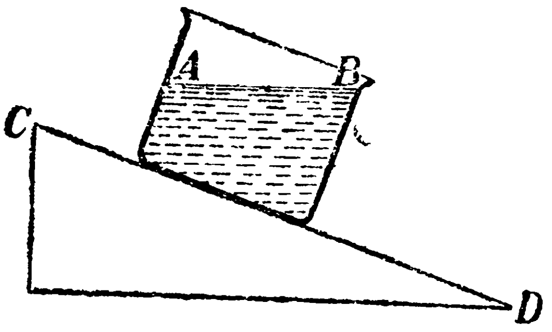



Рис. 22. Сосуд с водой скользит под уклон. Как расположится уровень воды?

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. 23) 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 одинаковости движений). Сила же $Q$ придавливает частицы воды ко дну сосуда. Действие всех отдельных сил $Q$ на воду будет такое же,

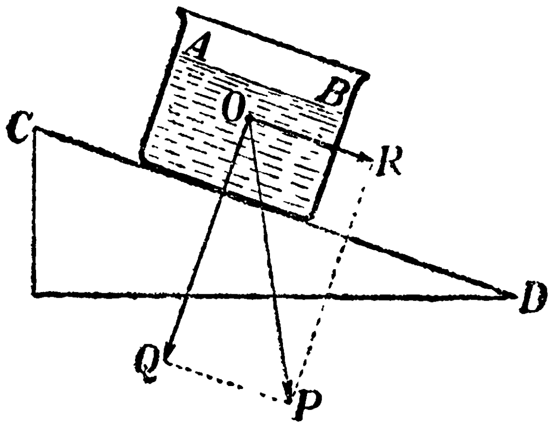



Рис. 23. Решение задачи рис. 22.

как и действие силы тяжести на частицы всякой покоящейся жидкости: уровень воды установится перпендикулярно к направлению сил $Q$, т. е. параллельно длине наклонной плоскости.

А как установится уровень воды в баке, который 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).

Не вытекает ли это также из приведенного ранее объяснения? Конечно. Ведь в случае равномерного движения сосуда по наклонной плоскости частицы самого сосуда не получают никакого ускорения; а раз тело движется равномерно, значит — нет никакой движущей силы. Частицы же воды 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, уровень воды принимает на мгновение наклонное положение.

## КОГДА ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНИЯ НЕ ГОРИЗОНТАЛЬНА?

Если бы в сосуде или в баке, скользящих 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 меньшею силою). 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 странная 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 уровень ко дну бака, 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 тела от отвесного положения, мы приписываем наклон окружающим предметам. Пьяный, шатаясь, воображает, что все кругом него покачивается. Помните у Некрасова:

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

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

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

„Мы можем устроить опыт,— пишет он далее,— выясняющий причину кажущегося отклонения плоскости пола от горизонтального положения. Для этого достаточно иметь в вагоне чашку с вязкой жидкостью, напр., глицерином: во время ускорений движения поверхность жидкости принимает наклонное положение. Вам не раз случалось, без сомнения, наблюдать нечто подобное на водосточных жолобах вагонов: когда поезд в дождь подходит к станции, вода из жолобов на вагонных крышах стекает вперед, а при отходе

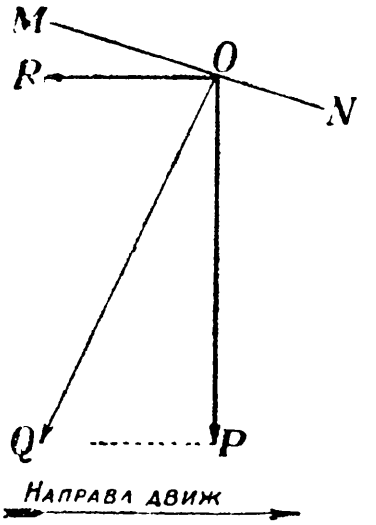



Рис. 24. Какие силы действуют на предметы в вагоне трогающегося поезда.

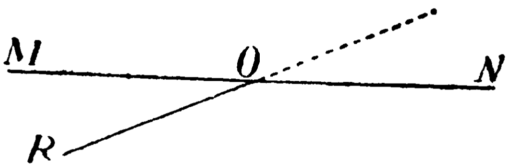



Рис. 25. Почему пол трогающегося вагона кажется наклонным.

поезда — назад. Происходит это оттого, что поверхность воды поднимается у края, противоположного тому направлению, в каком совершается ускорение хода".


Рис. 26. Почему в трогающемся вагоне жидкость переливается через задний край блюдца.

„Разберемся в причине этих любопытных явлений. Когда поезд движется ускоренно, задняя стенка вагона как бы настигает нас каждую секунду на величину ускорения. Мы испытываем давление со стороны задней стенки вагона, и сами прижимаемся к ней. Если $R$ (рис. 24) сила, с какою мы прижимаемся к задней стенке вагона, $P$ — сила (вес), с какой мы прижимаемся к полу, то равнодействующая $Q$

изобразит то направление, которое мы в таком состоянии будем считать отвесным. Направление *MN*, перпендикулярное к новому отвесу, станет для нас горизонтальным. Следовательно, прежнее горизонтальное направление *OR* будет казаться поднимающимся в сторону движения поезда и имеющим уклон в обратном направлении (рис. 25).

Что произойдет при таких условиях с жидкостью в тарелке? Для этого представим себе, что горизонтальное направление не совпадает с уровнем жидкости, а следует (рис. 26) по линии *MN*. Это наглядно видно на рисунке, где стрелка указывает направление движения вагона. Теперь ясно, почему вода должна вылиться через задний край тарелки (или дождевого жолоба).

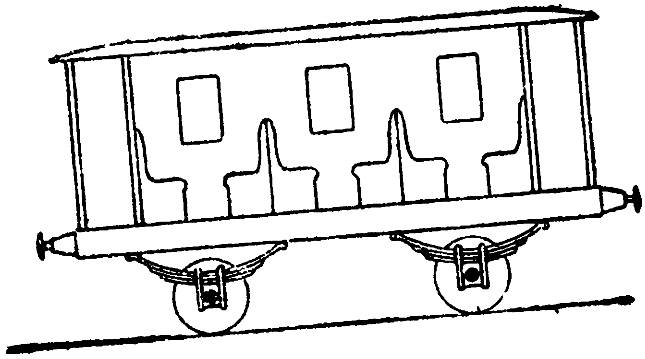


Рис. 27. Что кажется пассажиру трогающегося вагона.

Картину всех явлений, происходящих в вагоне в момент отправления, легко представить себе, если вообразить, что вагон наклонился соответственно новому положению „горизонтальной“ линии (рис. 27). Вы поймете, почему стоящие в вагоне люди должны при этом упасть назад. Этот всем известный факт обычно объясняют тем, что ноги увлекаются полом вагона в движение, в то время как туловище и голова еще находятся в покое. [1]

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

„Пусть сосуд с водою имеет поступательное, но неравномерное движение, меняющее скорость и то ускоряющееся, то замедленное.

Такое объяснение в общем тоже согласуется с фактами. Розможны, вероятно, еще и другие объясненяя тех же явлений. Для науки представляет, однако, ценность лишь то объяснение, которое не только согласуется с фактами, но и дает возможность учитывать их количественно. В данном случае мы должны поэтому предпочесть объяснение, которое было изложено раньше,—именно, что пол под ногами перестает быть горизонтальным. Оно дает возможность учесть явление количественно, чего нельзя сделать, придерживаясь обычной точки зрения. Если, например, ускорение поезда при отходе со станции равно 1 метру в секунду за секунду, то угол $QOP$ (рис. 24) между новым и старым отвесным направлением легко вычислить из треугольника $QOP$, где $QP:OP = 1:9{,}8 =$ около $0{,}1$:

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

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

## МАГНИТНАЯ ГОРА

В Калифорнии, близ города Голливуда, знаменитого центра кинематографической промышленности, есть гора,

---

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".

о которой местные автомобилисты (т. е. добрых три четверти населения) утверждают, что она обладает магнитными свойствами. Дело в том, что на небольшом участке дороги, длиною 60 метров, наблюдаются у подножия этой горы необыкновенные явления. Участок этот идет наклонно. Если в автомобиле, едущем вниз по наклону, выключить мотор, то машина катится назад,

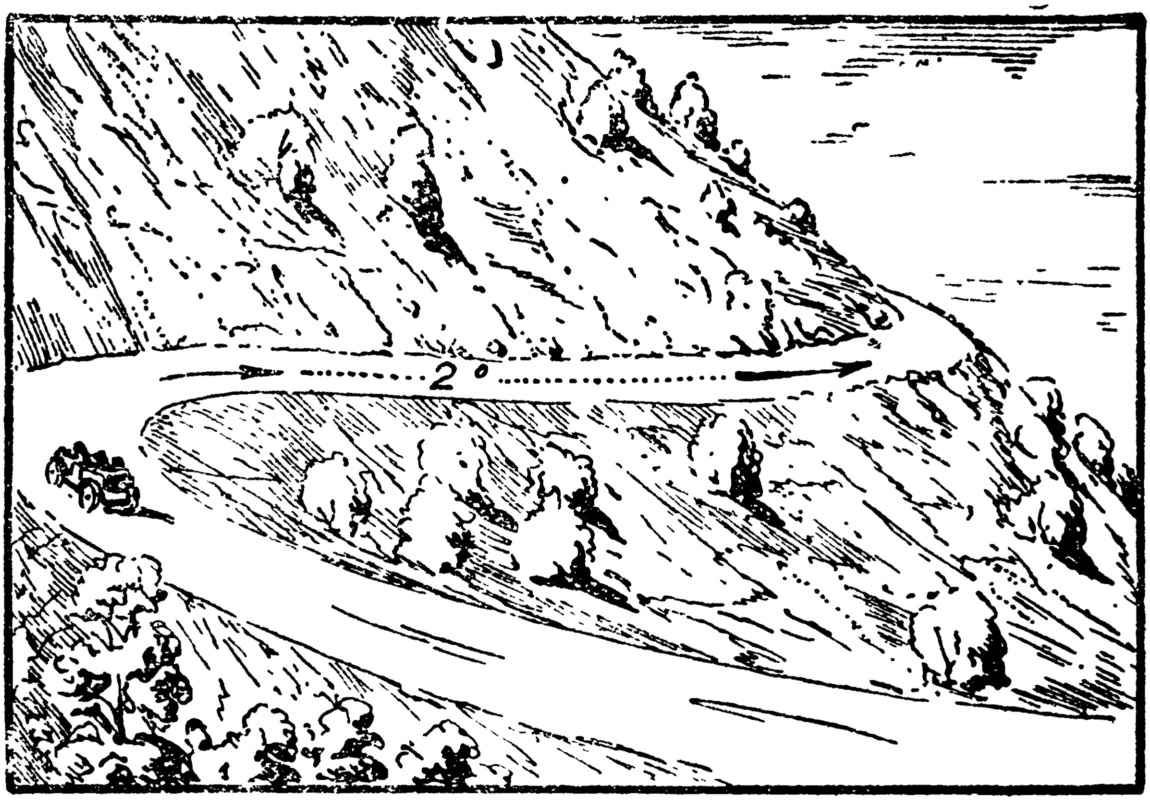



Рис. 28. Мнимая магнитная гора в Калифорнии.

т. е. *вверх по уклону*, подчиняясь, повидимому, магнитному притяжению горы.

Это поразительное свойство горы, давно отмеченное старинным индейским преданием, считается установленным настолько достоверно, что в соответствующем месте дороги красуется даже доска с описанием феномена.

Нашлись, однако, люди, которым показалось сомнительным, чтобы гора могла притягивать автомобили. Для проверки произвели нивеллировку участка дороги под горой. Результат получился неожиданный: то, что все принимали за подъем, оказалось **спуском** с уклоном в 2°. Такой уклон может заставить автомобиль катиться без мотора, так как на очень хорошем шоссе даже обыкновенная повозка скатывается уже при уклоне $1^1/_2$°.

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

## РЕКИ, ТЕКУЩИЕ В ГОРУ

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

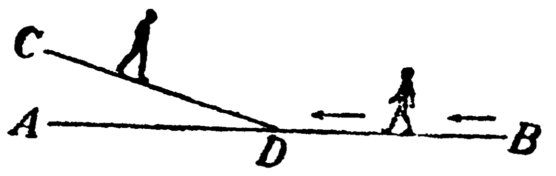



Рис. 29. Улицы *CD* и *DB* обе наклонные. Что представляется пешеходу на улице *DB*.

„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 *AB* (рис. 29) и видя в некотором расстоянии другую дорогу *CD*, встречающуюся с *AB*, мы представляем себе подъем дороги *CD* более крутым, чем на самом деле. С удивлением убеждаемся мы затем, что вторая дорога вовсе не так крута, как мы ожидали“.

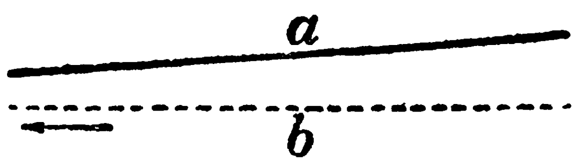



Рис. 30. Слабо наклоненная дорога *a* вдоль ручья *b*.

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

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

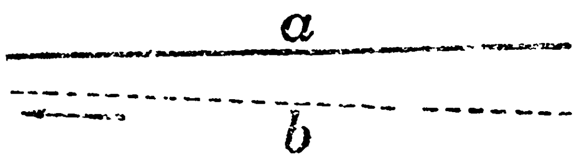


Рис. 31. Пешеходу на $a$ кажется, что ручей $b$ течет вверх.

„При спуске по слабо наклоненной дороге, идущей вдоль ручья $b$ (рис. 30), который имеет еще меньшее падение, т. е. течет почти горизонтально, — нам часто кажется, что ручей течет вверх по уклону в направлении стрелки (рис. 31). В этом случае мы тоже считаем направление дороги горизонтальным, так как привыкли принимать ту плоскость, на которой мы стоим, за основу для суждения о наклоне других плоскостей“ (Бернштейн).

## ЗАДАЧА О ЖЕЛЕЗНОМ ПРУТЕ

Железный прут просверлен строго посредине. Через отверстие проходит тонкая прочная игла, вокруг которой, как вокруг горизонтальной оси (рис. 32), прут может вращаться. В каком положении остановится прут, если его закружить?

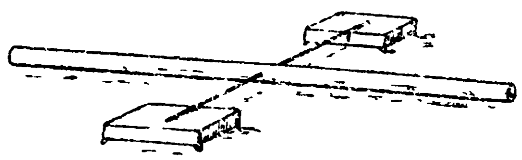


Рис. 32. Прут уравновешен на оси. Если его закружить, в каком положении он остановится?

## Решение

На этот вопрос часто дают такой ответ: 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; следовательно, предсказать, в каком именно положении он остановится, так же невозможно, как предвидеть, на какой цифре остановится шарик рулетки.

Почему же правильное решение столь простой задачи представляется многим невероятным? Потому что обычно

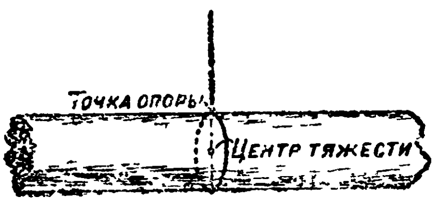



Рис. 33. Палка, подвешенная за середину: положение равновесия.

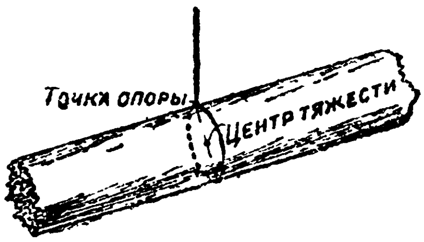



Рис. 34. Та же палка, выведенная из равновесия.

имеют перед глазами опыт с палкой, подвешенной за середину: такая палка устанавливается горизонтально. Отсюда делается поспешный вывод, что подпертый на оси прут тоже должен сохранять равновесие только в горизонтальном положении.

Однако, подвешенная палка и подпертый прут находятся не в одинаковых условиях. Просверленный прут, опирающийся на ось, подперт строго в центре тяжести, а потому находится в так называемом безразличном равновесии. Палка же, подвешенная на нити, имеет точку привеса не в центре тяжести, а выше его (см. рис. 33). Тело, так подвешенное, будет находиться в покое только тогда, когда его центр тяжести лежит на одной отвесной линии с точкой привеса, — а это будет лишь при горизонтальном положении палки; при наклонении центр тяжести отходит от отвесной линии (рис. 34). Эта привычная картина и мешает многим согласиться с тем, что прут на горизонтальной оси может удержаться в наклонном положении.

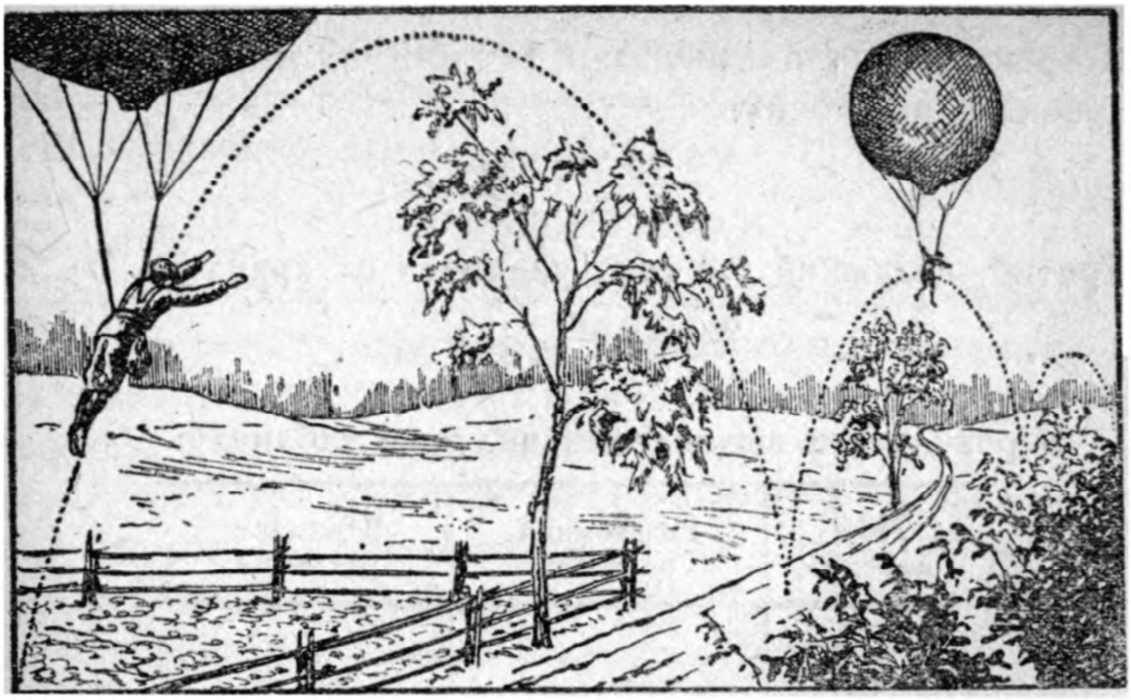


Рис. 35. Прыжки с воздушным шаром (см. стр. 65).

# ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

# ПАДЕНИЕ И БРОСАНИЕ

## ПОЧЕМУ СТРУЯ РАЗБИВАЕТСЯ НА КАПЛИ?

Чуть поверните завинченный край водопровода; вода польется тонкой струей. Рассмотрите ее внимательно: в верхней, прозрачной своей части она сплошная; в нижней, мутной—разбивается на капли. Почему? Что мешает ей оставаться сплошной на всем протяжении?

Вы поймете причину, если представите себе, что кран роняет каждую 0,1 секунды по свинцовому шарику. Как расположатся они вдоль линии падения, скажем, через 1 секунду? Первый шарик двигался целую секунду и потому (сопротивлением воздуха пренебрегаем) окажется от крана на расстоянии

$$\frac{gt^2}{2} = \frac{980 \times 1^2}{2} = 490 \text{ см.}$$

Второй шарик, падавший в течение 0,9 сек., будет от крана на расстоянии

$$\frac{980 \times 0{,}9^2}{2} = 397 \text{ см.}$$

Третий, падавший 0,8 сек., удалится от крана на

$$\frac{980 \times 0{,}8^2}{2} = 314 \text{ см.}$$

В результате вычислений получим табличку:

| №№ шариков | Расстояния от крана | Взаимное удаление |
|---|---|---|
| 10 | 5 см. | 15 см. |
| 9 | 20 „ | 24 „ |
| 8 | 44 „ | 34 „ |
| 7 | 78 „ | 44 „ |
| 6 | 122 „ | 54 „ |
| 5 | 176 „ | 64 „ |
| 4 | 240 „ | 74 „ |
| 3 | 314 „ | 83 „ |
| 2 | 397 „ | 93 „ |
| 1 | 490 „ | |

Вы видите, что с удалением от отверстия крана расстояние между шариками возрастает. Будь шарики связаны резиновой нитью, она растянулась бы внизу гораздо больше, чем вверху. Водяная струя и есть такая растяжимая нить: чем дальше от крана, тем она вытягивается сильнее. В самом верху она поэтому сравнительно толста, далее становится все тоньше, пока, наконец, не разрывается на отдельные капли.

По той же причине горные ручьи, круто стекающие с большой высоты, рассыпаются в нижней части на мелкие капельки. Характерный пример — водопад Интерлакена (в Швейцарии), который внизу превращается в облако водяной пыли.

## СЕМИМИЛЬНЫЕ САПОГИ

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

Рис. 36. Шар-прыгун в сложенном виде умещается в чемодане.

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

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

Человек, привязанный к аэростату, увлекается вниз вместе с шаром силою в 1000 г, или около 1 000 000 дин.

Вес самого шара-прыгуна, как легко рассчитать, равен около 12 килограммов. Значит, сила в 1 000 000 дин действует на массу в $12+60=72$ кг. Ускорение $a$, приобретаемое массою в 72 кг от силы в 1 000 000 дин, равно

$$a = \frac{1\,000\,000}{72\,000} = \text{около } 14 \text{ см.}$$

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

$$v^2 = 2 \times 980 \times 100.$$

Откуда

$$v = \text{около } 440 \text{ см.}$$

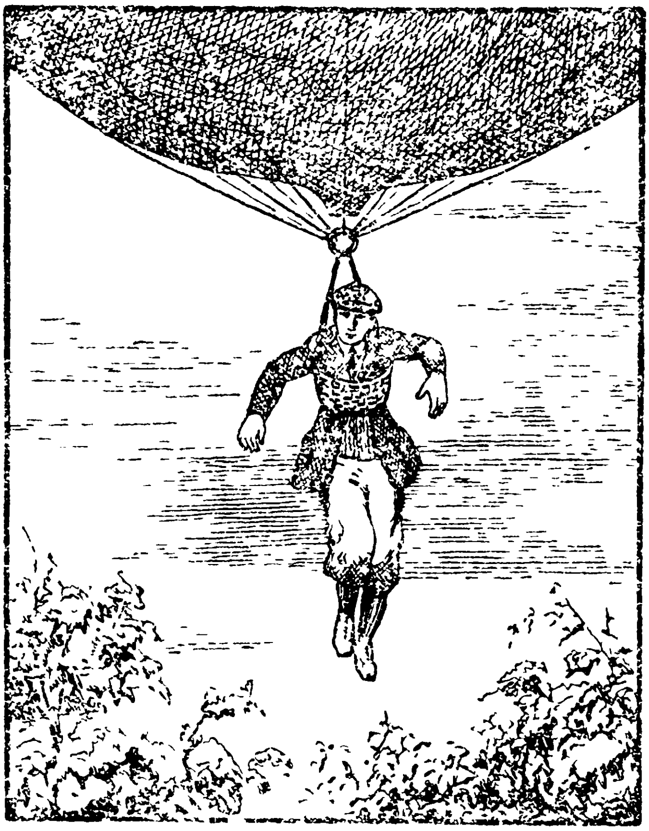


Рис. 37. Спортсмен, подвязанный к шару.

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

$$440 \times \frac{60}{72} = 370 \text{ см.}$$

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

$$370^2 = 2 \times 14 \times h,$$

откуда

$$h = 49 \text{ метров.}$$

Итак, сделав наибольшее усилие, которое при обычных условиях подняло бы тело спортсмена на 1 метр, человек с шаром подпрыгнет на высоту 49 метров. Интересно вычислить п р о д о л ж и т е л ь н о с т ь подобных прыжков. Прыжок вверх на 49 метров при ускорении в 14 см должен длиться (формула $h = \frac{at^2}{2}$)

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9800}{14}} = 26 \text{ сек.}$$

Чтобы прыгнуть вверх и вернуться, надо затратить 52 секунды.

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 70 раз) слабее, чем на нашей планете.

Любопытно проделать еще один расчет — определить величину наибольшего прыжка в д л и н у. Чтобы сделать прыжок в длину, спортсмен должен дать себе толчок под некоторым углом к горизонту. Пусть он сообщает при этом своему телу скорость $v$ (черт. 38). Разложим ее на две составляющие: вертикальную $v_1$ и горизонтальную $v_2$. Они равны:

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

Скорость $v_1$ истощится через $t$ секунд, при чем

$$v_1 = at,$$

откуда

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

Значит, продолжительность подъема и спуска тела равна:

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

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

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

Это и есть длина прыжка.

Наибольшей величины она достигает при $\sin 2\alpha = 1$, так как sin не может быть больше единицы. Отсюда $2\alpha = 90°$ и $\alpha = 45°$. Значит,

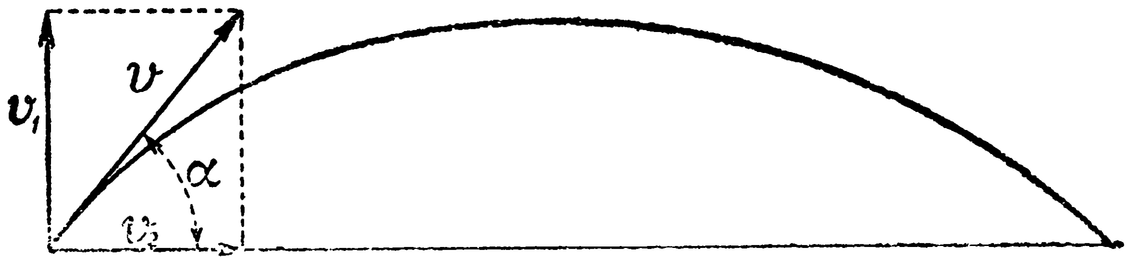



Рис. 38. Как летит косо брошенное тело.

при отсутствии сопротивления атмосферы спортсмен сделает самый длинный прыжок тогда, когда оттолкнется от Земли под углом к ней в половину прямого. Величину этого наибольшего прыжка узнаем, если в формулу

$$s = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{a}$$ подставим $v = 370$ см; $\sin 2\alpha = 1$; $\alpha = 14$ см.

Получим

$$s = \frac{370^2}{14} = 98 \text{ метров } [1].$$

Прыжки вертикальные—около 50 метров и под углом в 45° на расстояние 250 метров—дают возможность прыгать через многоэтажные дома. [2]

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

[2] Ленинградские спортсмены пользовались шаром в 260 куб. м весом 106 кг, с подъемной силой 89 кг. Предлагаем читателю самостоятельно выполнить для такого шара расчеты этой статьи.

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

## ЧЕЛОВЕК-БОМБА

„Человек-бомба“—поучительный номер цирковой программы, показывавшийся в последние годы в многих городах Европы; имели возможность видеть его и ленинградцы. Он состоит в том, что артист помещается в канале пушки, выбрасывается оттуда выстрелом, описывает высокую дугу в воздухе и падает на сетку в 30 метрах от орудия. 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 выбрасывается не силою порохового взрыва. Дым устраивается лишь для эффекта, чтобы поразить зрителей.

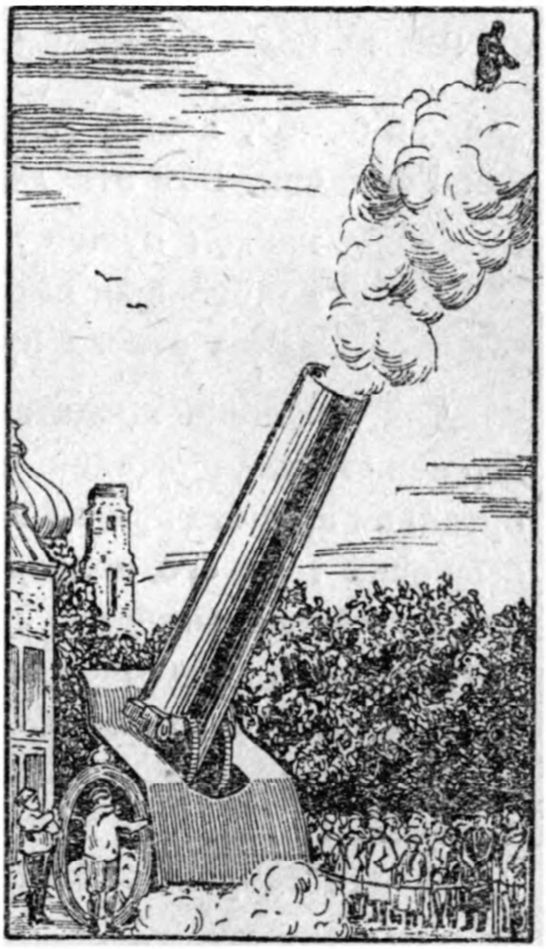


Рис. 39. Человек-бомба.

На деле же движущей силой является пружина, одновременно со спуском которой появляется бутафорский дым: создается иллюзия, что человек-бомба выстреливается порохом. Порохового выстрела человеческий организм не мог бы перенести.

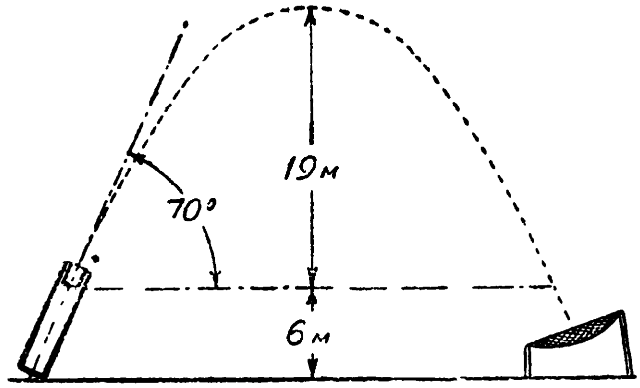



Рис. 40. Полет человека-бомбы.

На рис. 40 изображена схема описываемого циркового номера. Немецкий журнал „Ракета", посвященный проблеме межпланетных перелетов, заинтересовался этим опытом и собрал числовые данные о номере, выполняемом искуснейшим из „людей-бомб", неким Лейнертом, подвизавшимся в цирках Германии. Вот эти данные:

наклон пушки . . . . . . . . . 70°;
наибольшая высота полета . . . 25 м;
длина ствола пушки . . . . . . 6 м.

Для механики представляют большой интерес те совершенно исключительные условия, в которых находится организм артиста при выполнении этого номера. В момент выстрела тело его подвергается давлению, ощущаемому как усиленная тяжесть. Затем, во время свободного полета, артист, подобно всякому свободно брошенному телу, [1] ничего не весит. Наконец в момент падения на сетку артист снова подвергается действию усиленной тяжести. Названный выше артист переносил все это без вреда для здоровья. Интересно в точности установить

[1] См. мои книги „Занимательная физика", кн. 2-я, а также „Межпланетные путешествия", изд. 7-е, 1932 г.

эти условия, так как будущие моряки вселенной, которые отважатся отправиться на ракете в мировое пространство, должны будут пережить подобные же ощущения (потому-то этим номером цирковой программы и заинтересовался журнал германских звездоплавателей).

В первой фазе движения артиста, которая протекает еще внутри пушки, нас интересует величина искусственной тяжести. Мы узнаем ее, если вычислим ускорение тела в канале пушки. Для этого необходимо знать проходимый телом путь, т. е. длину пушки, и скорость, приобретаемую в конце этого пути. Первый известен — 6 метров. Скорость же можно вычислить зная, что это та скорость, с какою тело начинает свой свободный полет в воздухе на высоту 25 метров.

В предыдущей статье мы вывели формулу:

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

где $t$ — продолжительность подъема вверх, $v$ — начальная скорость, $\alpha$ — 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; $\alpha = 70°$. Что касается высоты подъема $h$, то, как видно из чертежа 40, мы должны принять ее равной $25 - 6 = 19$ метрам. Итак, искомая скорость

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

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

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

Мы узнали, что ускорение, с каким движется тело артиста в стволе орудия, равно 35 метрам в секунду за секунду, т. е. $3^1/_2$ раза больше обычного ускорения 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 это ощущение усиленного веса? Из формулы $s = \frac{at^2}{2} = \frac{at \times t}{2} = \frac{vt}{2}$ имеем:

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

откуда

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

Значит, артист в течение более чем полусекунды будет ощущать, что он весит не 70 кило, а около 300 кило.

Перейдем теперь ко **второй** фазе рассматриваемого номера — к свободному полету артиста в воздухе. Здесь нас интересует продолжительность полета; сколько времени артист не ощущает никакой тяжести?

В предыдущей статье мы установили (стр. 68), что продолжительность подобного перелета равна

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

---

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

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

$$\frac{2 \times 20{,}6 \times \sin 70^\circ}{9{,}8} = 4{,}1 \text{ сек.}$$

Состояние полной невесомости длится более 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 такою же скоростью, с какою начал свой полет. На деле сетка поставлена несколько ниже, и, конечно, скорость артиста будет больше; однако, разница весьма мала, и, чтобы не усложнять расчетов, мы ею пренебрежем. Принимаем, следовательно, что артист достиг сетки со скоростью 20,6 м в секунду. Измерено, что артист, упав на сетку, вдавливает ее на 1,5 метра. Значит скорость 20,6 м превращается в нуль на пути 1,5 метра. По формуле $v^2 = 2aS$ имеем:

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

откуда ускорение

$$a = \frac{20{,}2^2}{2 \times 1{,}5} = 141 \text{ метр.}$$

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

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

Едва ли даже привычный организм циркача мог бы безнаказанно перенести 15-кратное усиление тяжести, если бы это не длилось столь ничтожное время. Ведь человек

70 кг весом приобретает вес целой тонны! Сколько-нибудь длительное действие такой нагрузки должно было бы раздавить человека, как раздавливает кита его собственный вес, когда он случайно оказывается на суше.

## ЗАДАЧА О ФУТБОЛЬНОМ МЯЧЕ

Подбрасывая мяч, футболист сообщает ему скорость в 40 метров в секунду. Где закинет он шар дальше: на экваторе или в Ленинграде?

### Решение

Спортсмену, не знакомому с механикой, вопрос этой задачи показался бы несуразным. Но наш читатель не будет им застигнут врасплох: ему известно, что в формулу дальности метания (стр. 68)

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

входит ускорение тяжести $a$, которое в разных точках земного шара несколько различно по величине. На экваторе оно равно 978 см в сек.$^2$, на широте Ленинграда 982 см (если в обоих случаях места лежат на уровне моря). Наибольшая дальность достигается, мы знаем, при угле $\alpha = 45°$. Сопротивлением воздуха в случае метания мяча с умеренной скоростью можно пренебречь. Подставив в формулу известные нам значения букв, получаем для дальности метания величину:

на экваторе:

$$\frac{40^2}{9{,}78} = 163 \text{ м } 52 \text{ см},$$

в Ленинграде:

$$\frac{40^2}{9{,}82} = 162 \text{ м } 88 \text{ см}.$$

Разница получается более заметная, чем можно было ожидать: экваториальный футболист закидывает мяч на 64 см дальше ленинградского при одинаковом усилии мышц.

Это показывает, между прочим, что при сравнении физкультурных достижений в разных странах необходимо учитывать влияние неодинаковости силы тяжести. Тогда таблица мировых рекордов получит, быть может, иной вид, чем теперь.

## ПО ХРУПКОМУ МОСТУ

Озадачивающий случай описывает Жюль Верн в романе „В 80 дней вокруг света". Висячий железнодорожный мост в Скалистых горах (Америка) грозил обрушиться из-за поврежденных балок. Тем не менее, бравый машинист, „истый янки", решил вести по нему пассажирский поезд.

„ — Но мост может обрушиться!

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

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

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

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

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

т. е. на 30 сантиметров. Надо думать, что 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 мог действительно 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-ти ходах поршня в секунду“, порождающих 150-километровую часовую скорость. Такой скорости паровоз ни при каких условиях развить в то время не мог.

Надо заметить, впрочем, что нечто сходное с подвигом американского машиниста проделывают иногда конькобежцы: они рискуют быстро проскальзывать по тонкому льду, который наверное проломился бы под ними при медленном движении. Вода вследствие инерции не успевает в такой короткий промежуток времени уступить место прогибающемуся льду. Сопротивление воды движению твердого тела прогрессивно растет с увеличением скорости этого движения: поэтому так важно, чтобы конькобежец проскользнул по льду возможно быстрее.

## ТРИ ПУТИ

(Задача)

На отвесной стене начерчен круг (рис. 41), диаметр которого равен 1 метру. 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 по гладким желобкам. Какая из трех дробинок раньше достигнет окружности?

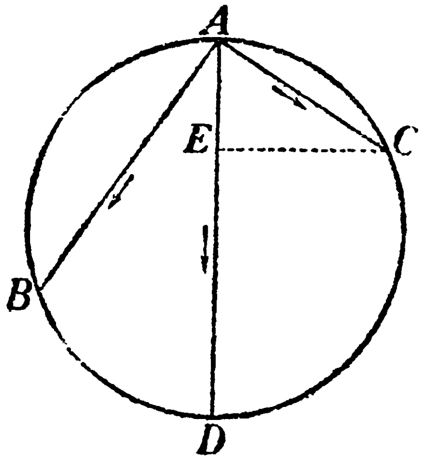


Рис. 41. Задача о трех дробинках.

### Решение

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

Опыт обнаруживает поспешность этих заключений; все три дробинки достигают окружности одновременно!

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

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

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

откуда

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

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

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

где $a$—ускорение движения по наклонной линии $AC$. Из подобия прямоугольных треугольников имеем

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

о черт. 41 показывает, что

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

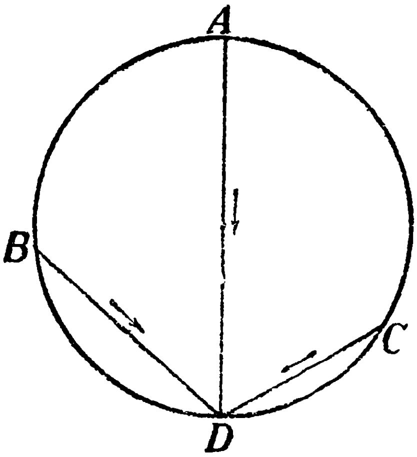


Рис. 42. Другая задача о дробинках.

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 силою тяжести по линиям $AD$, $BD$ и $CD$, лежащим в отвесном круге (черт. 42). Движение началось одновременно в точках $A$, $B$ и $C$. Какое тело раньше достигнет точки $D$?

В таком виде задача эта была поставлена и разрешена Галилеем в книге, где впервые изложены открытые им законы падения тел. Читатель не затруднится теперь доказать самостоятельно, что тела должны достичь точки $D$ одновременно.

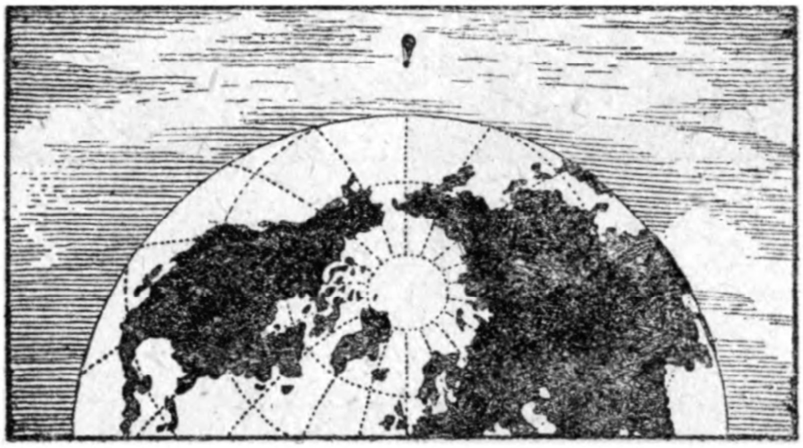


Рис. 43. Карусель.

## ГЛАВА ПЯТАЯ

# КРУГОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

### ПРОСТОЙ СПОСОБ ПРИБАВИТЬСЯ В ВЕСЕ

Мы часто желаем больным своим знакомым „прибавиться в весе“. Если бы речь шла только об этом, то они могли бы добиться увеличения веса очень скоро без усиленного питания и ухода за своим здоровьем. Им достаточно сесть в карусель. Катающиеся на карусели обычно и не подозревают, что, сидя в ее возке, они буквально прибавляются в весе. Несложный расчет покажет нам величину прибавки.

Пусть (черт. 44) *MN*—та ось, вокруг которой обращаются возки карусели. Возок и пассажир подвержены действию силы *R*, стремящейся удалить их от центра (центробежный эффект). Вес возка *P* направлен отвесно. Равнодействующая этих сил $Q$ будет ощущаться пассажиром как вес. Мы видим, что новый вес $Q$ больше нормального $P$ и равен $\frac{P}{\cos\alpha}$. Чтобы найти величину угла $\alpha$ между $P$ и $Q$ надо знать величину силы $R$. Сила эта равна центростремительной силе; следовательно, порождаемое ею ускорение

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

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

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

Теперь находим величину ускорения, порождаемого силою $R$:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{400} = 156 \text{ см.}$$

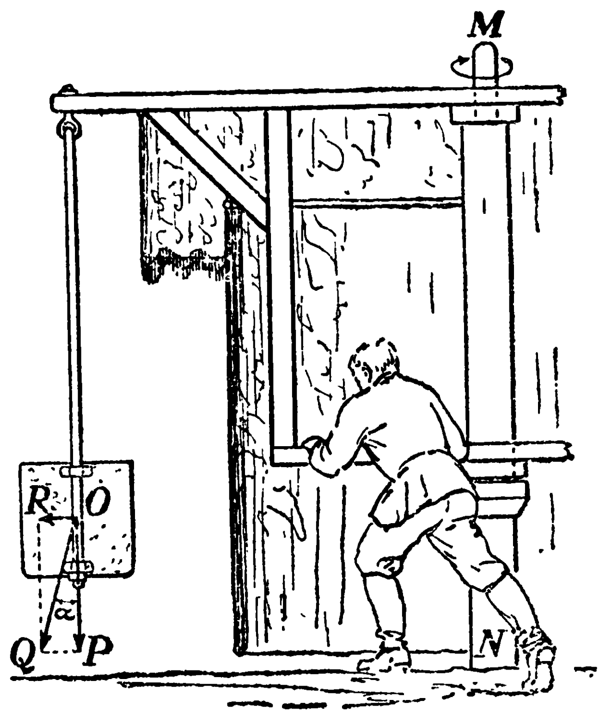



Рис. 44. Устройство карусели. Силы, действующие на движущийся возок.

Так как силы пропорциональны ускорениям, то

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{156}{980} = 0{,}041; \qquad \alpha = 9^\circ.$$

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

Значит,

$$Q = \frac{P}{\cos 9^\circ} = \frac{P}{0{,}987} = 1{,}013.$$

Если больной при обычных условиях весил 60 кг, то сейчас он прибавится в весе почти на 800 граммов. К сожалению, такая довольно значительная прибавка нисколько не улучшает здоровья: кружась на карусели, никто не чувствует себя здоровее, чем на „неподвижной“ земле.

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

## НЕБЕЗОПАСНЫЙ АТТРАКЦИОН

Ко мне явились однажды за советом по поводу проектируемого нового аттракциона в одном из парков Москвы. Проект представлял нечто вроде „гигантских шагов“, но к концам канатов (или штанг) предполагалось прикрепить аэропланы. При быстром вращении канаты должны откинуться и поднять вверх аэропланы с сидящими в них пассажирами. Устроители полагали, что при достаточном числе оборотов можно добиться совершенно горизонтального положения канатов.

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

Здесь нам пригодится чертеж 44, которым мы пользовались в предыдущей статье. Мы желаем, чтобы искусственная тяжесть $Q$ превосходила естественный вес $P$ не более, чем в 3 раза, т. е. чтобы лишь в предельном случае

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

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

$$\frac{1}{\cos\alpha} = 3, \text{ и } \cos\alpha = {}^1/_3 = 0{,}33,$$

откуда $\alpha =$ около $71^\circ$.

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

Рис. 45 изображает, как осуществлен проектируемый москвичами аттракцион в одном из городов Америки.

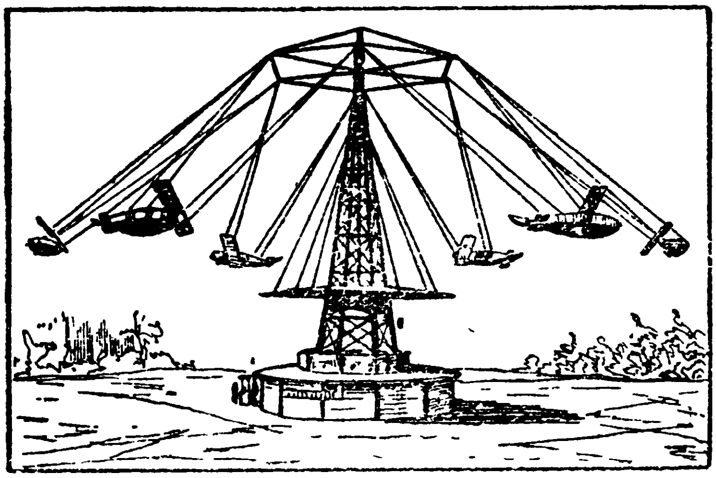


Рис. 45. Американская карусель с аэропланами.

Вы видите, что наклон канатов здесь далеко не достигает предельного.

## НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ЗАКРУГЛЕНИИ

„Сидя в вагоне железной дороги, который двигался по кривой, — рассказывает физик Э. Мах, — я заметил вдруг, что деревья, дома, фабричные трубы близ дороги приняли наклонное положение". Подобные явления часто наблюдаются пассажирами скорых поездов на Западе, где 100 километров в час—не редкость. Нельзя усматривать причину в том, что наружные рельсы на закруглениях укладываются выше внутренних, и что, следовательно, вагон по дуге закругления идет 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 в тот момент, когда поезд огибает кривую, принять наклонное положение. 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 черт. 46. На нем буквою $P$ обозначена сила тяжести, буквою $R$ — сила, равная центростремительной $S$. Равнодействующая обеих сил $Q$ будет заменять для пассажира силу тяжести; все тела в вагоне будут падать в этом направлении. Величина угла $\alpha$ отклонения от отвесного направления определяется из уравнения:

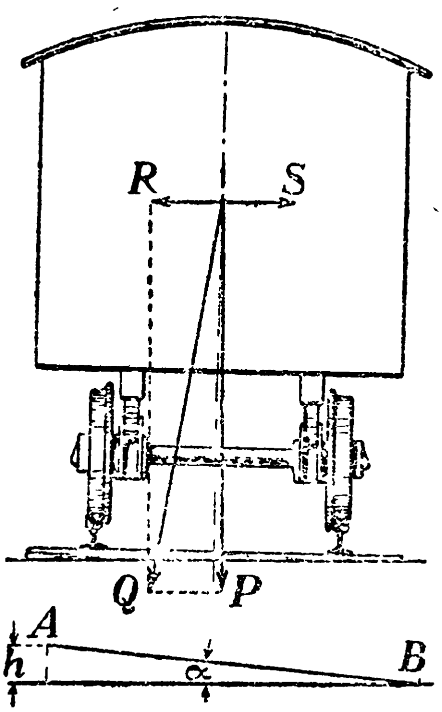


Рис. 46. Вагон идет по закруглению. Какие на него действуют силы? Внизу—поперечный наклон полотна дороги.

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

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

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

Пусть скорость поезда 18 метров в секунду (65 км в час), а радиус закругления—600 метров. Тогда

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{18^2}{600 \times 9{,}8} = 0{,}054.$$

Откуда $\alpha =$ около $3°$.

[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 — на 4′, на 45-й параллели—на наибольшую величину, 6′; на полюсе же и на экваторе вовсе не отклоняется).

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

Чтобы вагон на закруглении держался устойчиво, наружный рельс кривого пути возвышают над внутренним на величину, соответствующую новому положению горизонтальной линии. Например, для сейчас рассмотренного закругления наружный рельс $A$ (рис. 46) должен быть приподнят на такую величину $h$, чтобы

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

$AB$—ширина колеи—равна около 1,5 метра; $\sin \alpha = \sin 3° = 0{,}052$. Значит,—

$$h = AB \sin \alpha = 1500 \times 0{,}52 = 8 \text{ миллим.}$$

Наружный рельс должен быть уложен на 8 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

[1] Вернее—„временно-отвесное" для данного наблюдателя.

имеют гораздо меньший радиус, скорость же довольно велика, так что угол наклона получается весьма значительный. При скорости, например, 72 км в час (20 м в сек.) и радиусе 100 м, угол наклона определяется из уравнения

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

откуда $\alpha = 22^\circ$. На подобной дороге пешеходу, разумеется, не удержаться. Между тем, велосипедист только

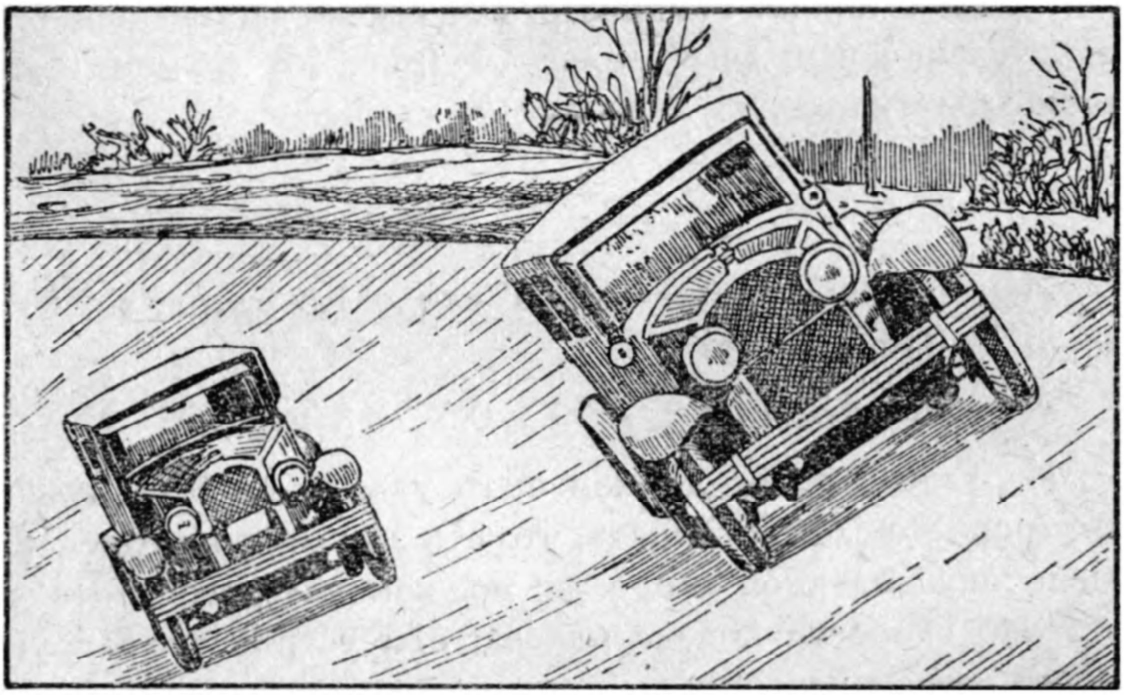


Рис. 47. Автомобиль на закруглении.

на такой дороге чувствует себя вполне устойчиво. Любопытный парадокс тяжести. Так же устраиваются специальные дороги для состязания автомобилей (рис. 47).

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

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{10^2}{5 \times 9{,}8} = 2, \text{ откуда } \alpha = 63^\circ.$$

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

## ЗЕМЛЯ НАБЕКРЕНЬ

Кому приходилось видеть как круто наклоняется на-бок 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 не ощущает даже, что его машина делает крен,— для него она держится в воздухе горизонтально. Зато, он ощущает нечто другое: во-первых, испытывает усиленную тяжесть, во-вторых — видит наклон всего обозреваемого ландшафта.

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

Возьмем числовые данные из действительности: летчик со скоростью 216 км в час (60 м в сек.) описывает винтовую линию диаметром 140 метров (черт. 48). Угол $\alpha$ наклона находим из уравнения

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{60^2}{70 \times 9{,}8} = 5{,}1,$$

---

[1] Об этом и о других велосипедных трюках см. также „Занимательную физику“, кн. 2-ю.

откуда $\alpha = 79^\circ$. Теоретически земля должна для такого летчика стать не только „набекрень“, но и почти „дыбом“, отклоняясь всего на $11^\circ$ от отвеса. (На практике, вследствие, вероятно, физиологических причин, в подобных случаях земля кажется повернутой не на $79^\circ$, а на $69^\circ$,— см. рис. 49).

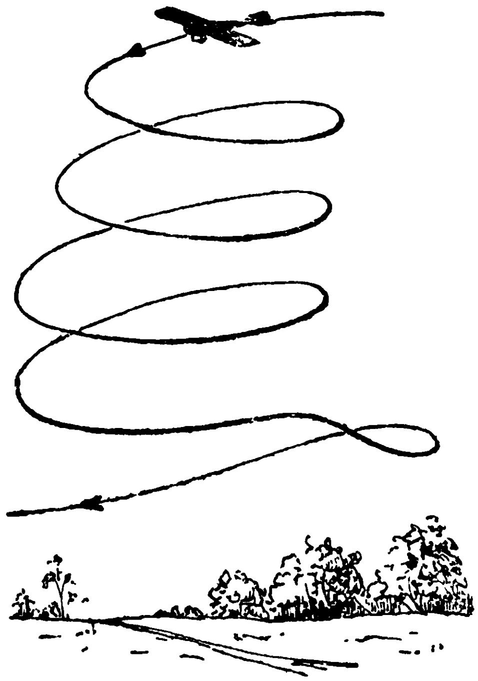


Рис. 48. Летчик описывает винтовую линию.

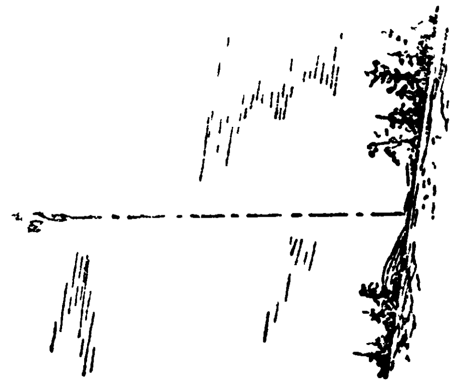


Рис. 49. Что кажется летчику рис. 48. (По Оберту.)

Что касается усиленной тяжести, то величину ее мы в сущности уже вычислили, когда находили угол наклона. Искусственная тяжесть определяется величиною центро-

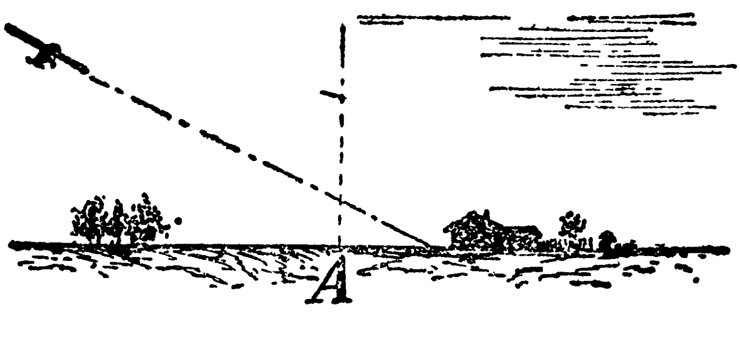



Рис. 50. Летчик летит по кривой большого радиуса (520 м) со скоростью 190 км в час.

стремительного ускорения $\frac{v^2}{r}$, а отношение ее к величине естественной тяжести равно:

$$\frac{v}{r} : g = \frac{v^2}{rg} = 5{,}1.$$

Значит, летчик, делая такой вираж, прижимается к сиденью в 5 раз сильнее, чем на прямом пути,— иначе говоря, чувствует себя примерно вшестеро тяжелее.

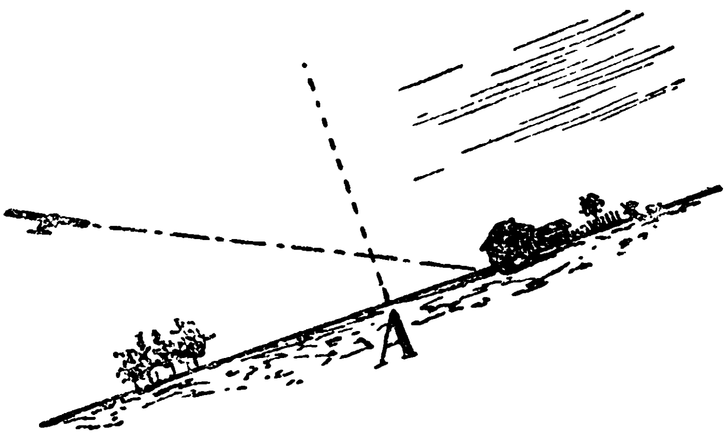



Рис. 51. Что кажется летчику рис. 50. (По Оберту.)

Искусственное увеличение веса может быть трагическим для летчика. Описан случай, когда летчик, делая со своим аппаратом так наз. „штопор" (падение по винтовой кривой малого радиуса), не мог не только подняться с места, но бессилен был даже сделать движение рукой. Расчет показывает, что тело его стало тяжелее в 8 раз! Лишь с величайшим напряжением сил удалось ему спастись от гибели.

## ПОЧЕМУ РЕКИ ИЗВИВАЮТСЯ?

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

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

Вообразим ручей, протекающий в приблизительно однородном грунте строго прямолинейно. Покажем, что такое течение долго сохраняться не будет. В каком-нибудь месте от случайных причин, — например, от неоднородности грунта, течение ручья чуть искривилось. Что будет дальше? Выровнит ли река свое течение сама? Нет, искривление будет расти. В месте искривления (рис. 52) вода, двигаясь криволинейно, будет, вследствие центробежного эффекта, напирать на вогнутый берег *А*, подмывать его и в то же время отступать от выпуклого берега *В*. Для выпрямления же ручья нужно как раз обратное: подмывание выпуклого берега и отступание от вогнутого. Вогнутость от подмывания станет 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.

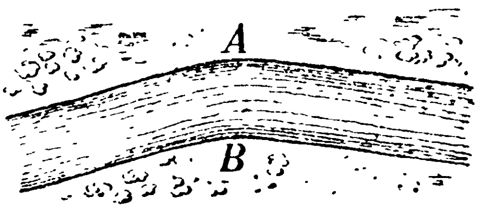


Рис. 52. Малейший изгиб ручья неудержимо растет.

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

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

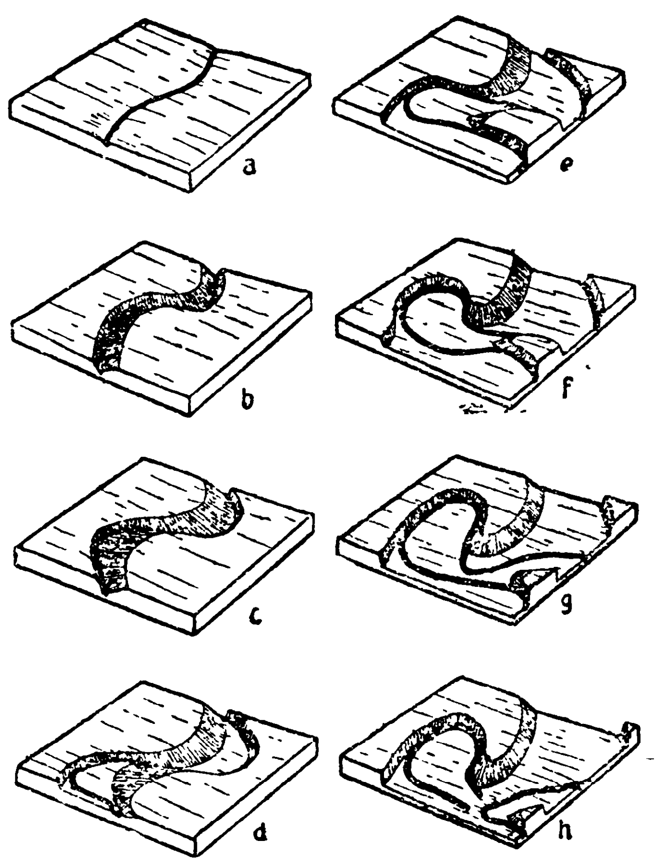


Рис. 53. Как постепенно увеличивается само собою искривление речного ложа.

Интересно проследить за дальнейшей судьбой речных извивов. Последовательные изменения вида речного русла упрощенно показаны на ряде рисунков табл. 53. На рис. *a* перед вами чуть изогнутая речка, на следующем *b*—

течение успело уже подточить вогнутый берег и несколько отступило от покатого выпуклого. На рис. *c* русло реки еще больше расширилось, а на рис. *d* превратилось уже в широкую долину, в которой ложе реки занимает только некоторую часть. На рис. *e*, *f* и *g* развитие речной долины пошло еще дальше; на рис. *g* изгиб речного ложа так велик, что образует почти петлю. Наконец, на рис. *h* вы видите, как река пробивает себе путь в месте сближения частей извилистого ложа и меняет там свое русло, оставляя в вогнутой части промытой долины так называемую „старицу", или „староречье",— стоячую воду в покинутой части русла.

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

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

[1] Мы совершенно не касались здесь действия вращательного движения Земли, сказывающегося в том, что реки северного полушария усиленно размывают свой правый берег.

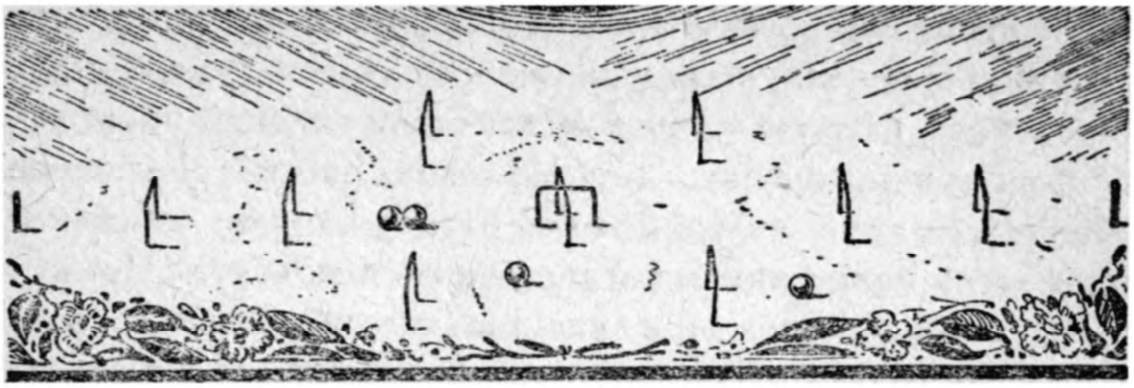


Рис. 54. Крокетная площадка.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

# УДАР

### В ПОИСКАХ САМОГО ПОНЯТНОГО

Тот отдел механики, где говорится об ударе тел, не пользуется обычно любовью учащихся. Он усваивается медленно, а забывается быстро, оставляя по себе недобрую память, как о клубке громоздких формул. А между тем он заслуживает большого внимания. Ведь соударение тел еще не так давно — лет 50 назад — считалось единственно понятным явлением из всех, происходящих в мире; вернее, его признавали единственным явлением, не требующим объяснения, так как ударом двух тел стремились объяснить возникновение всех прочих явлений природы. Еще Кювье, знаменитый натуралист XIX века, писал: „Удалившись от удара, мы не можем составить ясной идеи об отношениях между причиной и действием". Явление считалось объясненным лишь тогда, когда удавалось свести его причину к соударению молекул.

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

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

## МЕХАНИКА УДАРА

Знать механику удара тел значит уметь предвидеть, какова будет скорость соударяющихся тел после их столкновения. Эта окончательная скорость вычисляется различным образом, смотря по тому, 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 кило кофе по 8 р. с 2 кило кофе по 10 р., то цена смеси равна:

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

Точно также, когда неупругое тело, обладающее массою 3 кг и скоростью 8 см в сек., сталкивается с другим неупругим телом, масса которого 2 кг и скорость 10 см в сек., то окончательная скорость ($x$) каждого тела:

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

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

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

Если направление скорости $v_1$ мы считаем положительным, то знак плюс перед скоростью $x$ 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 разжимаются вслед за этим, восстановляя свою первоначальную форму. И в этой второй фазе тело настигающее теряет из своей скорости еще столько же, сколько потеряло оно в первую фазу, а тело настигаемое приобретает в скорости еще столько же, сколько приобрело оно в первую фазу. Двойная потеря скорости для более быстрого тела и двойной выигрыш ее для менее быстрого — вот собственно все об упругом ударе, что надо держать в памяти. Остальное сводится к чисто математическим переделкам. Пусть скорость более быстрого тела $v_1$, другого $v_2$, а массы их $m_1$ и $m_2$. Если бы тела были неупруги, то после удара каждое из них двигалось бы со скоростью

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

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

$$y = v_1 - 2\ (v_1 - x) = 2\,x - v_1$$

$$z = v_2 - 2\ (x - v_2) = 2\,x - v_2$$

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

Мы рассмотрели два крайние 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 восстановляют свою форму не полностью. К этому случаю мы еще вернемся; пока нам достаточно знать то, что сейчас было изложено.

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

$$v_1 - v_2 .$$

Скорость их расхождения после удара равна:

$$z - y .$$

Подставив вместо $z$ и $y$ их выражения, получаем:

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

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

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

## ИЗУЧИТЕ СВОЙ МЯЧ

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

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

Это вытекает из формулы упругого удара:

$$y = 2x - v_1 = \frac{2(m_1v_1 + m_2v_2)}{m_1 + m_2} - v_1.$$

Прилагая ее к случаю мяча, ударяющего в неподвижную площадку, мы можем массу $m_2$ площадки считать бесконечно большой; скорость ее равна нулю: $m_2 = \infty$, $v_2 = 0$. Тогда формула получает вид

$$y = -v_1,$$

т. е. мяч должен отскочить от площадки с тою же скоростью, с какою достиг ее. Но падая с высоты $H$, тело приобретает скорость

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

подброшенное же отвесно со скоростью $v$, тело достигает высоты

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

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

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

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

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

Когда мы говорим, что мяч „не вполне упруг", то мы собственно хотим сказать, что он не вполне восстановляет свою форму после ее изменения под действием внешней силы. При восстановлении его формы действует сила, меньшая той, которая эту форму изменила, и соответственно этому потеря скорости за период восстановления меньше первоначальной: она равна не $v_1 - x$, а составляет некоторую долю ее, которую обозначим правильною дробью $e$ („коэффициент восстановления"). Итак, потеря скорости при упругом ударе в первом периоде $=$ $= v_1 - v$, во втором $= e\,(v_1 - x)$. Общая потеря равна $(1 + e)\,(v_1 - x)$, а скорость $y$, остающаяся после удара, равна

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

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

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

Разность $z - y$ обеих скоростей равна $ev_1 - ev_2 = e\,(v_1 - v_2)$, откуда находим, что „коэффициент восстановления“

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

Для мяча, ударяющего о неподвижную площадку $z = (1 + e)\, x - ev_2 = 0$, $v_2 = 0$. Следовательно,

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

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

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

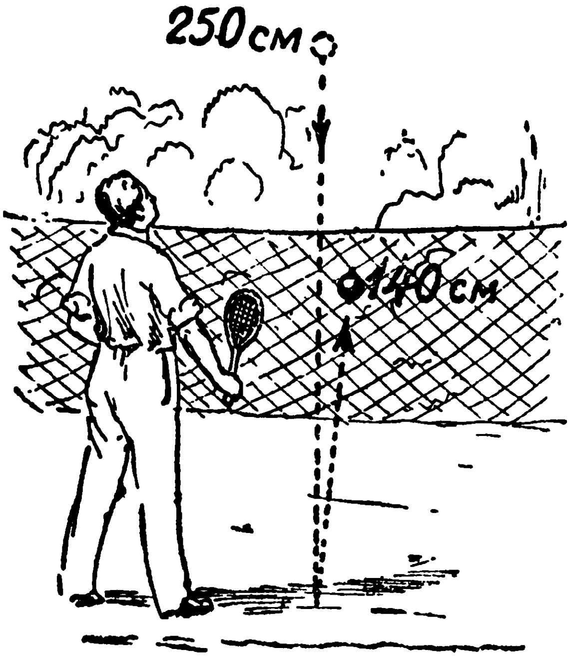



Рис. 55. Хороший мяч для тенниса должен подпрыгнуть примерно на 140 см, если его уронить с высоты 250 см.

Итак, мы нашли способ определять „коэффициент восстановления“ ($e$) мяча, характеризующий степень отступления его свойств от вполне упругих: надо измерить высоту, с которой его роняют, и высоту, на которую он подскакивает: квадратный корень из их отношения и будет искомый коэффициент.

По спортивным правилам, хороший теннисный мяч должен при падении с высоты 250 сантиметров подскакивать на высоту 127—152 сантиметров. 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., вольно выражаясь, 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 $H = 250$ сантиметров имеем:

$$\sqrt{\frac{h}{250}} = 0{,}75, \text{ откуда } h = 140 \text{ см.}$$

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

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_1}{140}}, \text{ откуда } h_1 = 78 \text{ см.}$$

Высоту $h_2$ третьего подъема мяча найдем из уравнения

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{78}}, \text{ откуда } h_2 = 44 \text{ см.}$$

Дальнейшие расчеты ведутся таким же путем.

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

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

Мы знаем, что

$$H=\frac{gT^2}{2};\ h=\frac{gt^2}{2};$$

$$h_1=\frac{gt_1^2}{2}\ \text{и т. д.}$$

И следовательно:

$$T=\sqrt{\frac{2H}{g}}\ t;=\sqrt{\frac{2h}{g}};$$

$$t_1=\sqrt{\frac{2h_1}{g}}\ \text{и т. д.}$$

Продолжительность подскакивания равна

$$T+t+t_1+t_2+\text{ и т. д.},$$

$$\text{т. е. }\sqrt{\frac{2H}{g}}+\sqrt{\frac{2h}{g}}+$$

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

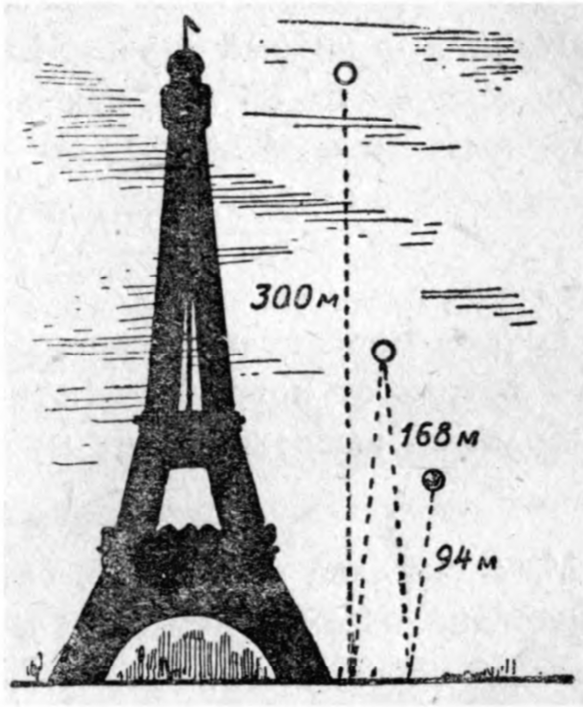


**Рис. 56. Как высоко подпрыгнул бы мяч, уроненный с верхушки Эйфелевой башни.**

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

$$\frac{1}{1-e}\sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Подставляя: $H=250$ см, $g=980$ см, $e=0{,}75$, имеем общую продолжительность подскакивания равной 2,8 сек.: мяч будет подскакивать в течение около 3 секунд.

Если бы его уронить с высоты Эйфелевой башни, подскакивание длилось бы около полуминуты (при отсутствии атмосферы).

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 в первый раз на 84 см; в действительности же он подскочил на 83 см; как видим, сопротивление воздуха почти не сказалось.

## ИГРА В МЯЧ

### (Задача)

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

### Решение

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

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

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

При столь умеренных скоростях можно пренебрегать сопротивлением воздуха.

## НА КРОКЕТНОЙ ПЛОЩАДКЕ

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

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

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

в котором $m_1 = m_2$ и $v_2 = 0$.

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

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

Пусть „коэффициент восстановления" (как его определить, читателю известно из предыдущей статьи) равен $e$. В предыдущей статье мы нашли для скоростей $y$ и $z$ обоих шаров после удара следующие выражения

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

Здесь, как и в прежних формулах,

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

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

$$x = \frac{v_1}{2}$$

$$y = \frac{v_1}{2}(1 - e)$$

$$z = \frac{v_1}{2}(1 + e)$$

Кроме того, легко убедиться, что

$$y + z = v_1$$
$$z - y = ev_1.$$

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

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

## ЧЕЛОВЕК-НАКОВАЛЬНЯ

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

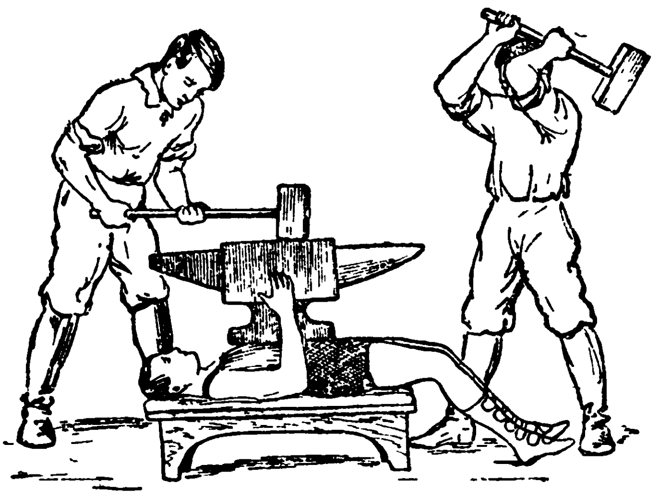


Рис. 57. Человек-наковальня.

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

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

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

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

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

$$z = 2\,v_1 . \frac{m_1}{m},$$

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

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

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

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 санти-

---

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

метр приходится не столь уж значительная нагрузка. Между основанием наковальни и телом человека кладется 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.

Тот же номер показывается иногда странствующими фокусниками в ином виде, изображенном на рис. 58.

Рис. 58. Мнимосокрушительный удар по голове.

Рис. 59. Измерение глубины лотом.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

# КОЕ-ЧТО О ПРОЧНОСТИ

## ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОКЕАНСКИХ ГЛУБИН

Средняя глубина океана около 4 километров, но в отдельных местах дно лежит ниже раза в два и более. Наибольшая глубина, как уже было указано, 10,7 км. Чтобы измерить подобную глубину, нужно спустить в него проволоку длиною свыше 10 километров. Но такая проволока имеет значительный вес; не разорвется ли она от собственного веса?

Вопрос не праздный; расчет подтверждает его уместность. Возьмем медную проволоку в 10 км длины; обозначим ее диаметр буквой $D$ (в частях сантиметра). Объем такой проволоки равен $= \frac{1}{4}\pi D^2 \times 1000000$ куб. см. А так как куб. см меди весит в воде круглым числом

8 граммов, то наша проволока должна представлять собою в воде груз в

$$\frac{1}{4}\pi D^2 \times 1\,000\,000 \times 8 = 6\,280\,000\ D^2 \text{ граммов.}$$

При толщине проволоки, например, 3 мм ($D = 0{,}3$ см) это составит груз в 560 000 граммов, т. е. 560 килограммов. Удержит ли такой толщины проволока груз свыше полутонны? Здесь мы должны немного отойти в сторону и посвятить страницу вопросу о силах, разрывающих проволоки и стержни. Отрасль прикладной механики, называемая „сопротивлением материалов“, устанавливает, что сила, необходимая для разрыва стержня или проволоки, зависит только от их материала и от величины их поперечного сечения. Зависимость от сечения проста: во сколько раз увеличивается площадь сечения, во столько раз возрастает необходимая для разрыва сила. Что же касается материала, то опытом найдено, какая сила нужна для разрыва стержня из данного материала, если сечение стержня 1 кв. миллиметр. В технических справочниках обычно помещается таблица величин этой силы — „таблица сопротивления разрыву“. Она представлена наглядно на рисунке 60. Рассматривая его, вы видите, что, например, для разрыва свинцовой проволоки

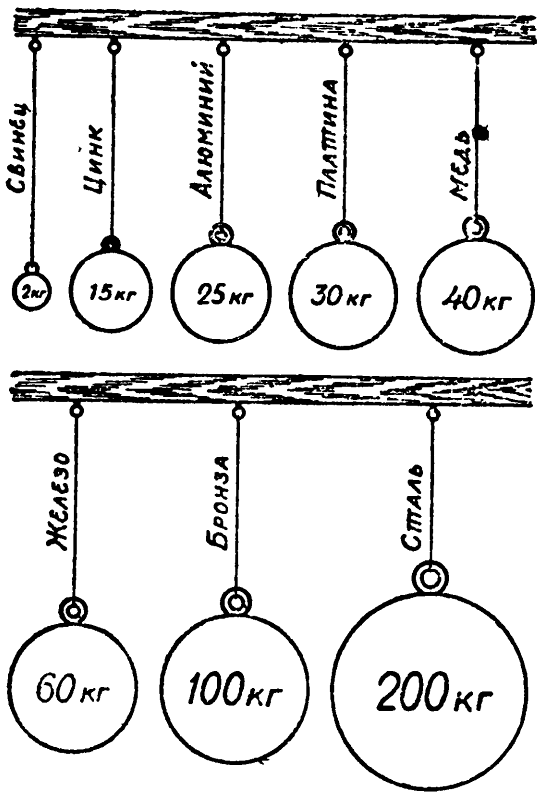


Рис. 60. Какими грузами разрываются проволоки из разных металлов (сечение—1 кв. мм).

(в 1 кв. мм сечением) нужна сила в 2 килограмма, медной — в 40 кг, бронзовой — в 100 кг, и т. п.

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

Вернемся теперь к начатому расчету. Какая сила достаточна для разрыва медной проволоки, диаметр которой $D$ см? Площадь ее сечения равна $\frac{1}{4}\pi D^2$ кв. см, или $25\pi D^2$ кв. мм. Справившись в нашей табличке, находим, что при сечении 1 кв. мм 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 $= 3140D^2$.

Сама же проволока весит, как мы уже вычислили, 6280 $D^2$ кг—вдвое 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 возрастает 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 $s$ кв. см, длина $L$ километра, а вес 1 куб. см ее вещества $\rho$ граммов, то вся проволока весит $100\,000\ sL\rho$ граммов; выдержать же нагрузку она может в $1\,000\ Q \times 100\ s = 100\,000\ Qs$ граммов, где $Q$ — разрывающая нагрузка на 1 кв. мм (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

$$\frac{Q}{\rho} = \frac{40}{9} = 4{,}4 \text{ км.}$$

А вот предельная длина для проволок из некоторых других материалов:

| | |
|---|---|
| для свинца . . . . . . . . . . | 200 м, |
| „ цинка . . . . . . . . . . | 2,1 км, |
| „ железа . . . . . . . . . . | 7,5 км, |
| „ стали . . . . . . . . | 25 км |

Но технически нельзя пользоваться отвесами такой длины; это значило бы напрягать их до недопустимой степени. Необходимо нагружать их лишь до известной части разрывающей нагрузки: для железа и стали, например, до $^1/_4$.

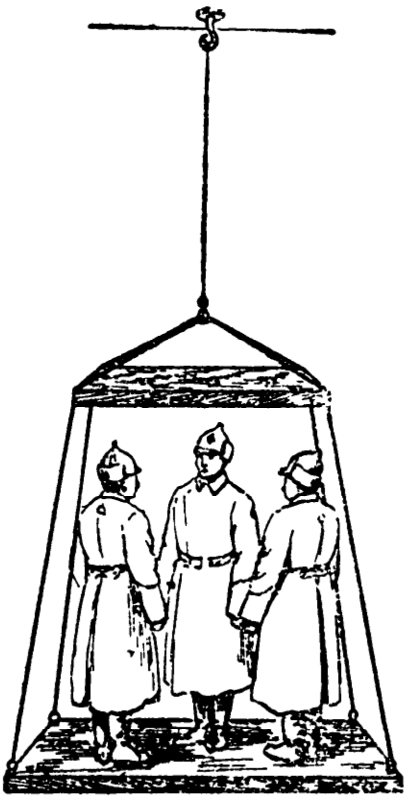


Рис. 61. Проволока из хромоникелевой стали выдерживает нагрузку 200 кг на кв. мм.

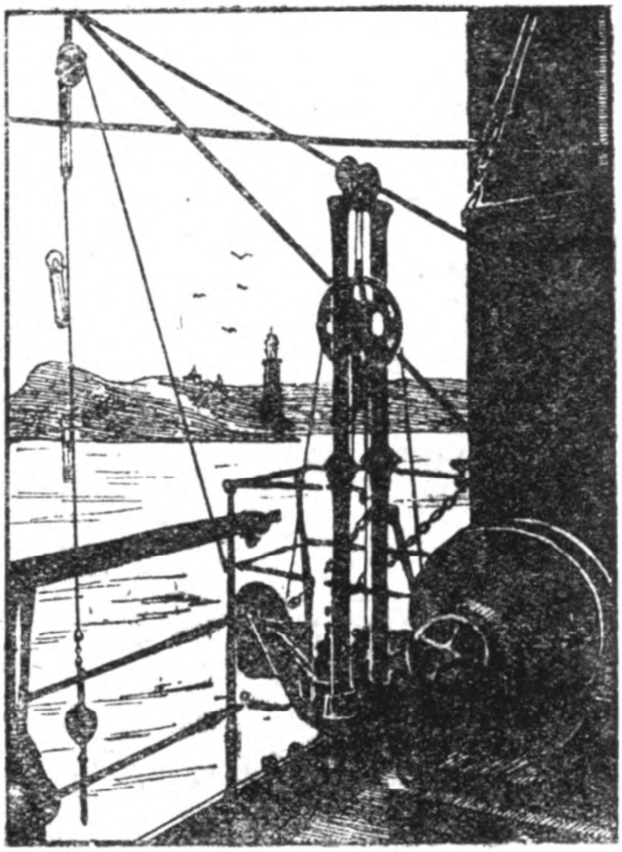


Рис. 62. Усовершенствованный глубомер для больших океанских глубин.

Значит, технически 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, очевидно, недостаточно для достижения дна океана в самых глубоких местах. Чтобы делать подобные промеры, приходится пользоваться особо прочными сортами стали,

## САМЫЙ КРЕПКИЙ МАТЕРИАЛ

К числу материалов, самых прочных на разрыв, принадлежит хромоникелевая сталь: чтобы разорвать проволоку из такой стали в 1 кв. мм сечением, надо приложить силу в 250 кг. Вы лучше поймете, что это значит, если взглянете на прилагаемый рис. 61: тонкая стальная проволока (ее диаметр чуть больше 1 мм) удерживает площадку с тремя взрослыми мужчинами!

Из такой стали и изготовляется лот-линь океанского глубомера. Так как 1 куб. см стали весит в воде 7 граммов, а допускаемая нагрузка на кв. мм составляет в этом случае $\frac{250}{4} = 62$ кг, то крайняя („критическая") длина отвеса из этой стали равна

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

Но глубочайшее место океана лежит еще на три километра 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. В обсерватории под Берлином запускают змея на 9 км, при чем проволоке приходится выдерживать натяжение не только от собственного веса, но и от давления ветра на нее и на змей (размеры змея $2 \times 2$ м).

## ЧТО КРЕПЧЕ ВОЛОСА?

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

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

т. е. $\frac{1}{500}$ кв. миллиметра. Значит, груз в 100 граммов приходится на площадь в 500-ю долю кв. миллиметра; на целый кв. мм придется 50 000 граммов, или 50 килограммов. Бросив взгляд на нашу наглядную табличку прочности, вы убедитесь, что человеческий волос по крепости должен быть поставлен между медью и железом!

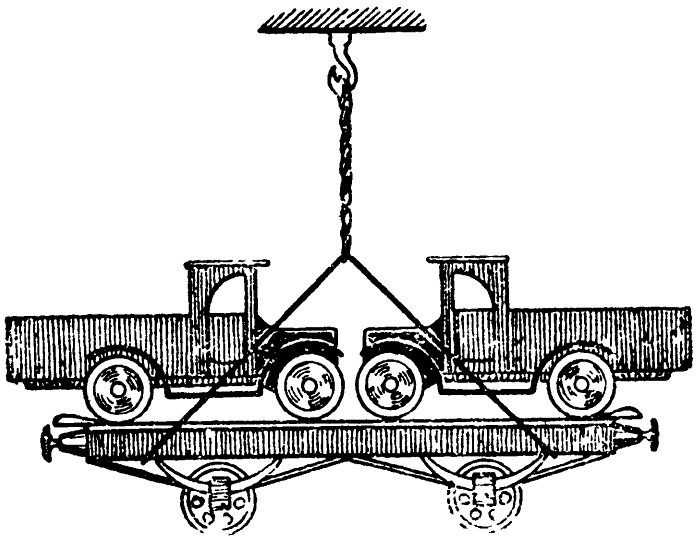


Рис. 63. Какой груз может выдержать женская коса.

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 своих метательных машин.

Вас не должен поэтому удивлять рис. 63, изображающий железнодорожную платформу и два грузовых автомобиля, подвешенные на женской косе: легко подсчитать что коса из 200 000 волос может удержать груз в 20 тонн.

## ПОЧЕМУ ВЕЛОСИПЕДНАЯ РАМА ДЕЛАЕТСЯ ИЗ ТРУБОК?

Какое преимущество в прочности имеет трубка перед сплошным стержнем, если кольцевое сечение трубки равно по площади сечению стержня? Никакого, — пока речь идет о сопротивлении **разрыву** или **сжатию**: трубка и стержень разрываются и раздробляются одинаковой силой. Но если речь идет о сопротивлении изгибающим усилиям, то разница между ними огромная; согнуть стержень значительно легче, чем согнуть трубку с равной площадью кольцевого сечения.

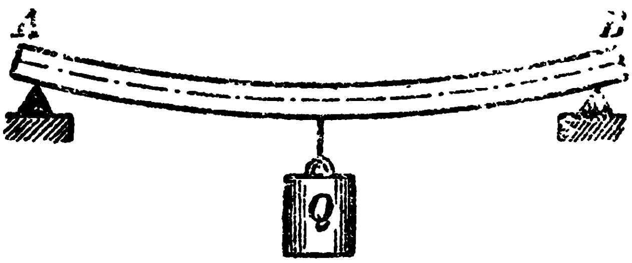



Рис. 64. Прогиб бруса.

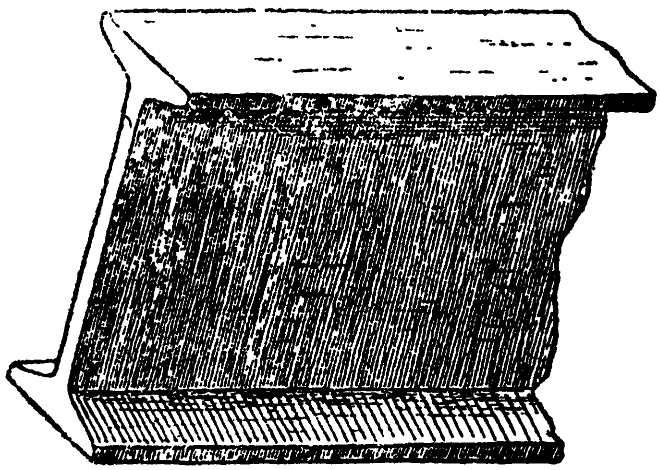


Рис. 65. Двутавровая балка.

Мы поймем, почему это, если рассмотрим поближе те напряжения, какие возникают в брусе при сгибании. Пусть в середине стержня $AB$ (черт. 64), подпертого на концах, действует груз $Q$. Под влиянием груза стержень прогибается вниз. Что при этом происходит? Верхние слои бруса стягиваются, нижние, напротив, растягиваются, некоторый пограничный 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 наз. „предел упругости“), пока не достигнут такого напряжения, которого груз $Q$ преодолеть не может: сгибание останавливается.

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

„Так как материал, прилегающий к нейтральной оси, слабо участвует в сопротивлении изгибу, то выгодно сосредоточить больше материала у поверхности, удалив его из средней части. Такое целесообразное распределение материала осуществлено в железных балках (рис. 65 и 66). На том же основании при равной площади кольцевое сечение выгоднее сплошного“. (О. А. Ривош, „Сопротивление материалов“.)

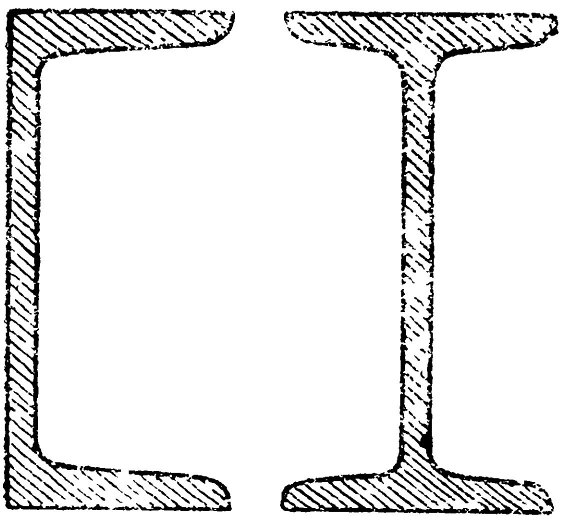


Рис. 66. Профиль двутавровой и коробчатой балок.

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

## ПРИТЧА О СЕМИ ПРУТЬЯХ

Всем известна старинная притча о семи прутьях. Чтобы убедить сыновей жить дружно, отец предложил им пере-

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

ломить пучок из семи прутьев. Сыновья пытались это сделать, но безуспешно. Тогда отец взял у них пучок, развязал и легко переломил каждый прут в отдельности. Смысл притчи станет для нас вполне ясен только тогда, если рассмотрим ее с точки зрения механики, именно — учения о прочности.

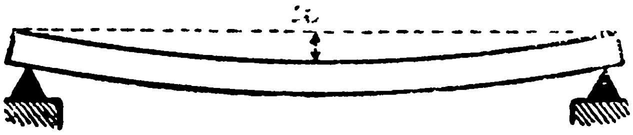


Рис. 67. Стрела прогиба ($x$).

Величина изгиба стержня измеряется в механике так называемой „стрелой прогиба" $x$ (рис. 67). Чем стрела прогиба в данном брусе больше, тем ближе момент излома. Величина же стрелы прогиба зависит от ряда обстоятельств, учитываемых — для случая круглого стержня — следующей формулой:

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

в которой:

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

Применим это к пучку прутьев. Семь его прутьев располагались, вероятнее всего, так, как показано на рис. 68, где изображено сечение пучка. Рассматривать подобный пучок как один круглый стержень (для чего он должен быть крепко перевязан) можно только с грубым приближением. Но мы ведь ищем лишь приближенное решение задачи. Диаметр связанного пучка, как легко видеть из чертежа, 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 надо затратить для прута силу $p$, а для всего пучка $P$. Соотношение между $p$ и $P$ вытекает из уравнения

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

откуда

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

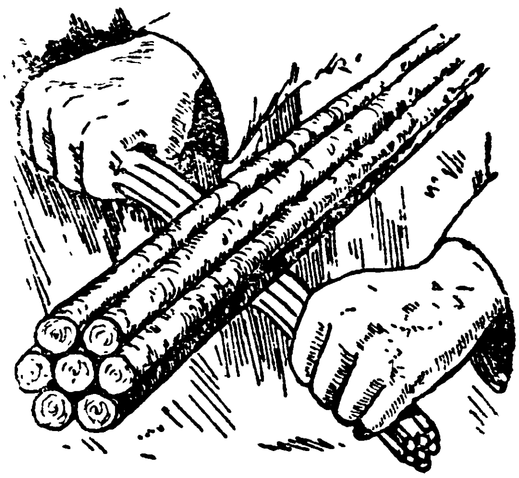


Рис. 68. К задаче о семи прутьях.

Теперь мы имеем более точное представление о сравнительной прочности отдельного прута и целого пучка. Мы видим, что отцу пришлось прилагать, хотя и семикратно, но в 80 раз меньшую силу, чем его сыновьям.

Значит, притча действительно хорошо иллюстрирует пользу объединения, придающего группе значительно бо́льшую обороноспособность, чем обладают разрозненные ее члены в сумме.

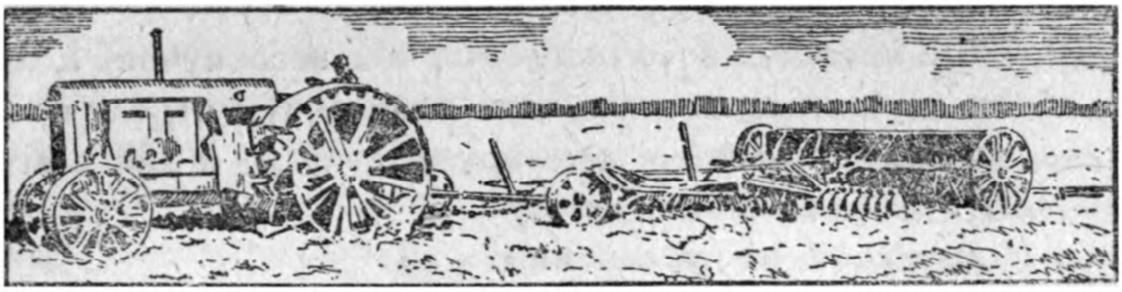


Рис. 69. Трактор-водитель за работой.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

# РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

## ЧЕГО МНОГИЕ НЕ ЗНАЮТ ОБ ЕДИНИЦЕ РАБОТЫ

— Что такое килограммометр?

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

Такое определение единицы работы многие считают исчерпывающим, особенно если прибавить к нему, что поднятие происходит на земной поверхности. Если и вы удовлетворяетесь приведенным определением, то вам полезно будет разобраться в следующей задаче, лет тридцать назад предложенной нашим 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 силою 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 самою главною 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, т. е. 60 000 см, то при массе ядра 1 кг (=1000 г) кинетическая его энергия составляет:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1000 \times 60000^2}{2} = 18 \times 10^{11} \text{ эргов.}$$

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

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

Вот какая значительная часть работы осталась неучтенной только из-за неточности определения килограммометра! Теперь становится очевидным, как надо это определение пополнить:

> килограммометр есть работа поднятия на земной поверхности 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 какою силою надо поднимать гирю? Силою 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 некоторою скоростью, не равною нулю, — а это значит, что выполнена работа не в 1 килограммометр, а больше.

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

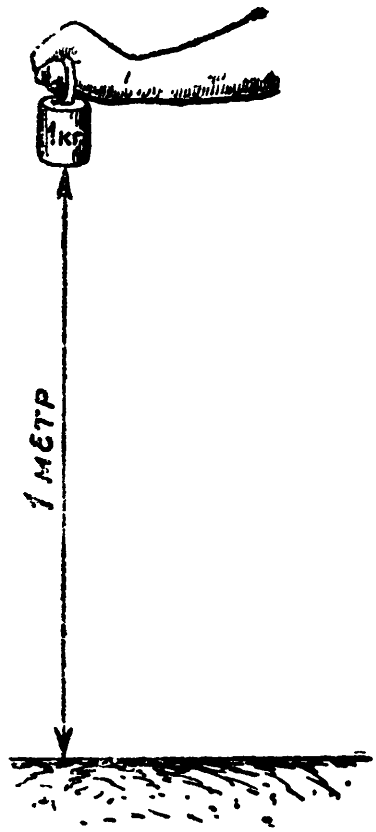


Рис. 70. Работа в 1 килограммометр.

Придется поднимать гирю очень обдуманно.[1] В начале поднятия надо давить на гирю снизу с силою больше 1 кг. Сообщив этим гире некоторую скорость по направлению вверх, следует прекратить давление руки на гирю и предоставить ей двигаться по инерции. Когда будет пройдено так некоторое расстояние, надо на протяжении остатка пути задерживать рукою движение гири, чтобы свести к нулю накопленную ею скорость. Действуя таким образом, т. е. прилагая к гире не постоянную силу в 1 кг, а переменную, изменяющуюся от величины больше 1 кг до нуля, а под конец становящуюся отрицательною, можем мы совершить работу ровно в 1 килограммометр.

## КАК НЕ НАДО ВЫЧИСЛЯТЬ РАБОТУ

Сейчас мы видели, как сложно выполнить килограммометр работы поднятием 1 кг на 1 м. Лучше поэтому вовсе не пользоваться этим обманчиво-простым, в дей-

[1] В дальнейших строках я излагаю то, что было сообщено мне проф. О. Д. Хвольсоном в беседе на эту тему.

ствительности 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.

Последнее условие — совпадение направлений — совершенно необходимо. Если им пренебречь, расчет работы может привести к чудовищным ошибкам, — вроде тех, какие мы находим в книге небезызвестного писателя-педагога, взявшегося за решение механических задач без надлежащей подготовки. На одной из приведенных у него задач поучительно остановиться подольше.

„Автомобиль весом 850 кг едет со скоростью 2 км в минуту. Какова его мощность?"

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

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

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

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

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

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

$$\frac{860 \times 0{,}02 \times 2000}{60} = 570 \text{ кг/м}.$$

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

$$570 : 75 = 7{,}5 \text{ пар. лош.}$$

## ТЯГА ТРАКТОРА

(Задача)

Мощность трактора Фордзон „на крюке" — 10 паров. лошадей. Вычислить силу его тяги при каждой из скоростей, если

| | | |
|---|---|---|
| первая скорость | . . . . . . | 2,45 км в час |
| вторая „ | . . . . . . | 4,52 „ „ „ |
| третья „ | . . . . . . | 11,32 „ „ „ |

[1] Часто говорят также „лошадиная сила". От этого устаревшего термина следовало бы совершенно отказаться: лошадиная сила есть не **сила**, а **мощность**, и при том не одной, а примерно полутора **живых** лошадей.

Решение

Так как мощность (в килограммометрах в сек.) есть секундная работа, т. е. в данном случае произведение силы тяги (в кг) на секундное перемещение (в метрах), то составляем для „первой“ скорости Фордзона уравнение

$$75 \times 10 = x \times \frac{2{,}45 \times 1000}{3600},$$

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

Таким же образом находим, что тяга при „второй“ скорости равна 540 кг, при „третьей“ — 220 кг.

Вопреки механике „здравого смысла“, тяга оказывается тем больше, чем скорость движения меньше.

## ЖИВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Может ли человек проявить мощность в целую паровую лошадь? Другими словами: может ли он выполнить в секунду 75 килограммометров работы?

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

$$70 \times 6 \times 0{,}17 = 71 \text{ кг/м},$$

т. е. почти в 1 паровую лошадь и, значит, превосходим живую лошадь по мощности раза в $1^1/_2$. Но, конечно, так напряженно работать мы можем всего несколько минут, а затем должны отдыхать. И если учесть эти промежутки бездействия, то в среднем работа наша не будет превосходить 0,1 паровой лошади.

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

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

$$500 : 75 = 7 \text{ паров. лошадей.}$$

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

При сельскохозяйственных работах принимается, что и человек и лошадь могут работать с перегрузкой в 200%, т. е. развивать тройную мощность по сравнению с нормальной. Эта способность живых двигателей кратковременно повышать свою мощность в несколько раз дает им большое преимущество перед двигателями механическими. На хорошем, ровном шоссе автомобиль в 10 пар. лошадей безусловно предпочтительнее повозки, запряженной двумя живыми лошадьми. Но на песчаной дороге такой автомобиль будет беспомощно увязать, между тем как пара лошадей, способных при нужде развивать мощность в 15 и более паровых лошадей, благополучно справляется с препятствиями пути.

У нас в СССР число механических лошадей, приходящееся на одного жителя, давно уже превосходит число живых лошадей. Мощность механических двигателей на 1 чел. равна у нас сейчас 1,4 пар. лошади, а по пятилетнему плану доводится к 1933 г. до 2,7 пар. лош. Это отвечает 2 и $3^1/_2$ механическим лошадям; их следует причислить к тем 0,2 живой лошади, которые имеются у нас в наличности в виде скота.

## 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 силою, меньшею 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 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; восемь лошадей развивают усилие, лишь в 3,8 раза превышающее усилие одной лошади, а дальнейшее увеличение числа совместно работающих лошадей дает еще худшие результаты.

Отсюда следует, что тягу, например, трактора в 10 паровых лошадей практически нельзя заменить тягой 15 живых рабочих лошадей, как можно было бы ожидать. Никакое вообще число живых лошадей не может заменить одного трактора, даже столь сравнительно малосильного, как „Фордзон“. [1]

У французов есть поговорка: „сто зайцев не делают одного слона“. Не с меньшим правом можем мы сказать, что „сто лошадей не заменяют одного Фордзона“.

## 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 одной — задача, разрешенная лишь техникой нового времени.

Сто лет назад самой мощной машиной был паровой двигатель в 20 паровых лошадей, весивший две тонны. На 1 паровую лошадь приходилось 100 кг веса машины. Отождествим для простоты работоспособность живой лошади с „паровой“ (хотя в действительности эта единица мощности превосходит в $1^1/_2$ раза работоспособность живой лошади). Тогда будем иметь в живой лошади

[1] Мощность „Фордзона“ на крюке — 10 пар. лошадей. Между тем, мощность трактора „Интернационал“ — 22 пар. лош., а „Холта“ (Челябинский завод) — 50 пар. лошадей.

1 паровую лошадь на 500 кг веса (средний вес лошади), в механическом двигателе — 1 пар. лошадь 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 тонн.

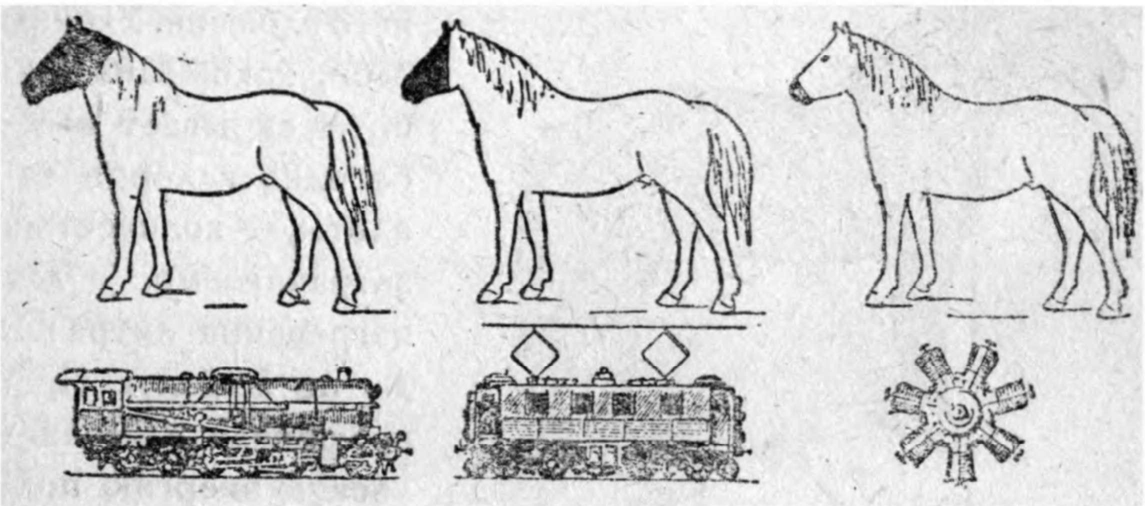


Рис. 71. Зачерненная часть контура лошади наглядно показывает, на какую долю веса приходится 1 паровая лошадь в разных механических двигателях.

А в электровозе, мощностью 4500 сил, при весе 120 тонн, мы имеем уже одну паровую лошадь на 27 кг веса.

Огромный прогресс в этом отношении представляют авиационные двигатели. Двигатель в 550 сил весит всего 500 кг: здесь одна паровая лошадь приходится, круглым счетом, на 1 кг веса. На рис. 71 эти соотношения представлены наглядным образом: зачерненная часть контура лошади показывает, на какую долю ее веса приходится 1 пар. лошадь в соответствующем механическом двигателе.

Еще красноречивее рис. 72: здесь маленькая и большая лошадь изображают, какой ничтожный вес стальных мускулов соперничает с огромной массой мышц живых.

Наконец, рис. 73 дает наглядное представление об абсолютной мощности небольшого авиационного двигателя: 162 пар. лош. при объеме цилиндра всего 2 литра.

Последнее слово в этом состязании еще не сказано современной техникой.[1] Мы не извлекаем из топлива всей

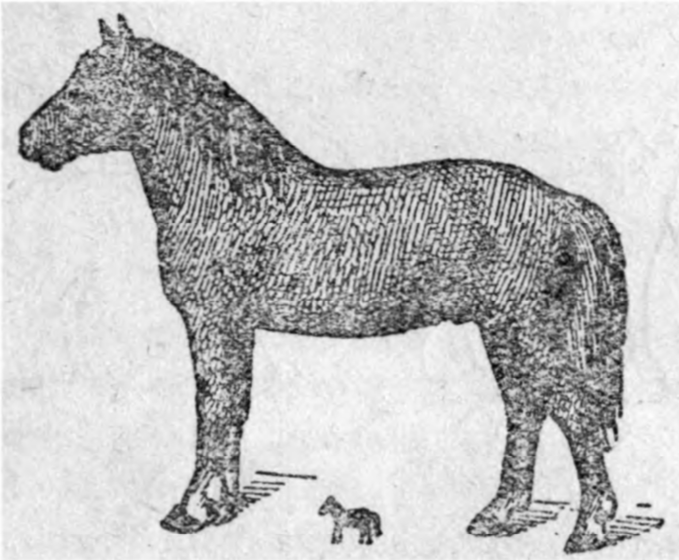


Рис. 72. Соотношение весов авиамотора и живой лошади при равных мощностях

той механической энергии, которая в него вложена. Уясним себе, какой запас работы скрывает в себе одна калория теплоты, — количество, затрачиваемое для нагревания литра воды на 1 градус. Превращенная в механическую энергию полностью — на 100%, — она доставила бы нам 427 килограммометров работы, т. е. могла бы, например, поднять груз в 427 кг на высоту одного

Рис. 73. Авиамотор с цилиндром емкостью 2 литра обладает мощностью 162 лошадей.

метра (рис. 74). Полезное же действие современных тепловых двигателей исчисляется только 10—30 процен-

[1] В данный момент первенство должно быть признано за бензиново-кислородным ракетным двигателем, изготовленным в Берлине инженерами германского „Союза звездоплавания": при весе 250 граммов мотор развивает 1380 индикаторных пар. лошадей, т. е. по 1 пар. лошади на 5,5 грамма.

тами: из каждой калории, пылающей в топке, они извлекают около сотни килограммометров, вместо теоретических 427.

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

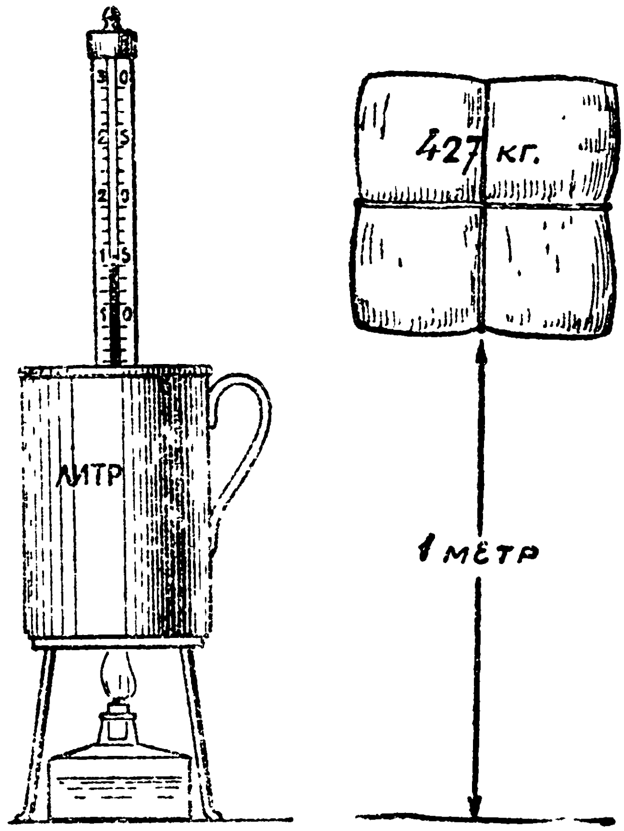



Рис. 74. Калория есть количество тепла, нагревающее литр воды на 1° Ц. Калория, превращенная в механическую работу, может поднять 427 кг на 1 метр.

Современное ружье при весе около 4 килогр. (из которых на действующие части оружия приходится примерно лишь половина) развивает при выстреле 400 килограммометров работы. Это кажется неособенно 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 сек., то, отнеся работу пороховых газов к полной секунде, получим для мощности ружейного выстрела огромное число 400 × 800 = 320 000 кгм в секунду, или 4300 паровых лошадей. Наконец, разделив эту мощность на вес действующих частей ружейной конструкции (2 кг), узнаем, что одна паровая лошадь приходится здесь на ничтожный вес механизма — в полграмма!

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

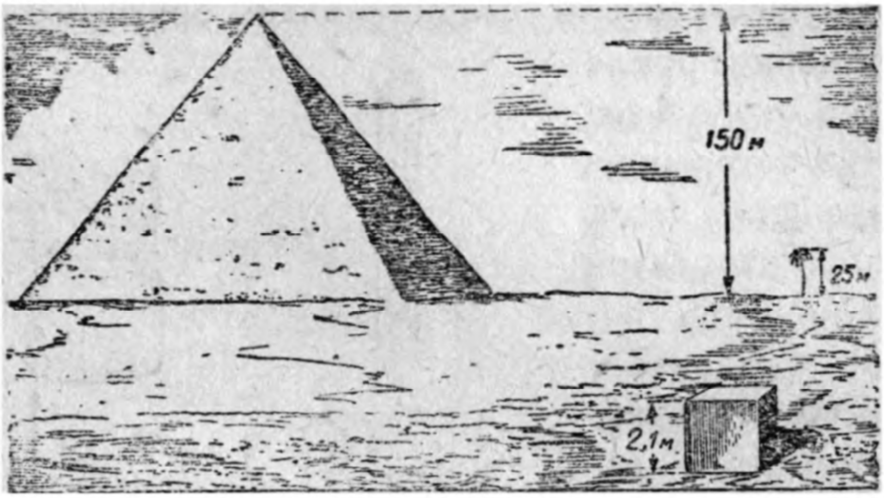



Рис. 75. Энергия снаряда крепостного орудия достаточна для поднятия 75 тонн на верхушку самой высокой пирамиды.

Если же брать не относительные числа, а поставить вопрос об абсолютной мощности, то все рекорды побивает артиллерийское орудие. Американская пушка бросает ядро в 900 кг со скоростью 500 м в секунду, развивая в 100-ю долю секунды около 11 миллионов килограммометров работы. Рис. 75 дает наглядное представление об этой чудовищной работе: она равнозначаща работе поднятия груза в 75 тонн (железного куба с ребром 2,1 м) на вершину пирамиды Хеопса (150 м). Работа эта развивается в 0,01 долю секунды; следовательно,

Рис. 76. Теплота, соответствующая энергии снаряда крупного морского орудия, достаточна для растопления 36 тонн льда.

мы имеем здесь дело с секундной мощностью в 1100 миллионов кг/м, или с 15 миллионами паровых лошадей. Столько живых лошадей с трудом наберется во всем СССР!

Показателен также и рис. 76.

## ОТВЕШИВАНИЕ С „ПОХОДОМ“

Иные продавцы отвешивают товар так: последнюю порцию, необходимую для равновесия, не кладут на чашку, а роняют с некоторой высоты. Коромысло весов качается, явно склоняясь в сторону товара и радуя глаз покупателя картиной более чем добросовестного отвешивания.

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

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

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

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

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

имеем

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

Итак, порция товара весом всего 10 граммов, падая на чашку, давит с силою 50 граммов. Покупатель обвешен на 40 граммов,— хотя покидает прилавок в твердой 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 лучше справятся с ней, пожалуй, и иные из моих читателей. Рассмотрим поэтому поближе задачу греческого мыслителя.

Какою кинетическою энергией обладает топор в момент удара о дерево? Во-первых, тою, которая была накоплена им при подъеме, когда человек взмахивал топором; и, во-вторых, — тою энергией, которую топор приобрел при нисходящем движении. Пусть он весит 2 килограмма и поднят на высоту 2 метров; при подъеме в нем накоплено $2 \times 2 = 4$ килограммометра 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 кг/м. 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 кг/м. Итак, в момент удара о дерево топор обладает 8 килограммометрами энергии.

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

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

откуда сила $F = 800$ килограммам.

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

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

## УПАКОВКА ХРУПКИХ ВЕЩЕЙ

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

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

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

Теперь понятно действие мягкой прокладки: она удлиняет путь действия силы и, следовательно, уменьшает величину надавливающей силы. 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. 77 и 78, устраиваются неграми Восточкой Африки. Задевая протянутую у земли бечевку, слон обрушивает на свою спину тяжелый отрубок дерева с острым наконечником. Больше изобретательности вложено в западню рис. 78:

животное, задевшее шнур, спускает стрелу, которая вонзается в жертву.

Откуда берется здесь энергия, поражающая животное, понятно: это — преобразованная энергия человека, поставившего западни. Падающий с высоты отрубок возвращает работу, которая была затрачена человеком при поднятии этого груза на высоту. Стреляющий лук второй западни также возвращает энергию, израсходованную охотником, который натянул тетиву. В обоих случаях животное только освобождает „заряд" энергии, накопленный в потенциальном состоянии. Чтобы после этого опять действовать, западни нуждаются в новом заряде.

Рис. 77. Слоновая западня в африканском лесу.

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. Он оттолкнул препятствие; бревно откачнулось, но вернулось на прежнее место, слегка ударив животное. Медведь оттолкнул бревно сильнее; оно возвратилось и ударило его крепче. С возрастающей яростью стал отбрасывать медведь бревно, — но, возвращаясь, оно наносило ему все более и более чувствительные удары. Обессиленный борьбой, медведь упал, наконец, вниз, на вбитые под деревом острые колья.

Эта остроумная западня не требует зарядки. Свалив первого медведя, она может вслед затем покончить со

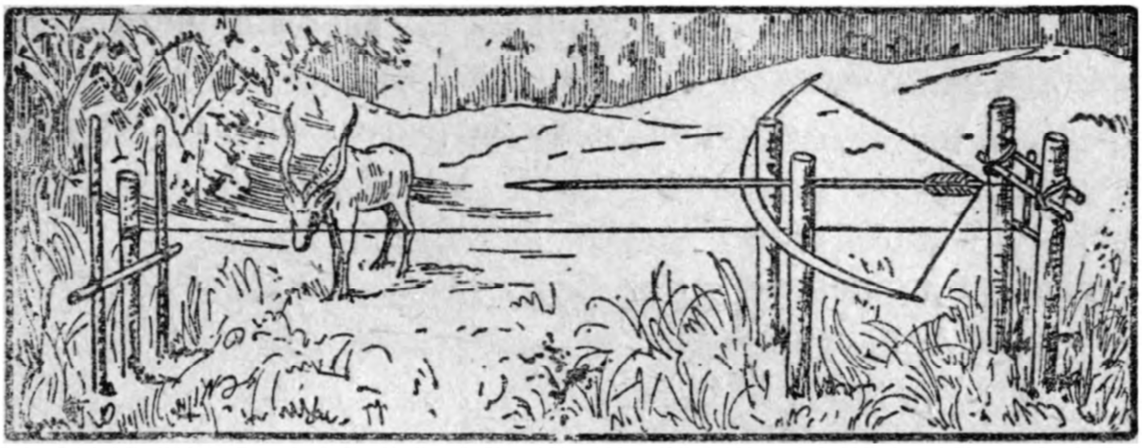


Рис. 78. Западня-самострел (Африка).

вторым, третьим и т. д., без всякого участия человека. Откуда же берется здесь энергия ударов, сваливших медведя с дерева и пронзивших его кольями?

В этом случае работа производится уже за счет энергии самого медведя. Он сам свалил себя с дерева и сам пробил себя кольями. Отбрасывая подвешенное бревно, он превращал энергию своих мускулов в потенциальную энергию поднятого бревна, которая затем преобразовывалась в кинетическую энергию бревна падающего. Точно так же, взбираясь на дерево, медведь преобразовал часть мускульной энергии в потенциальную энергию своего поднятого тела, которая затем проявилась в энергии удара его туши о колья. Словом, медведь сам

Рис. 79. Медведь в борьбе с подвешенным бревном.

избивает себя, сам сваливает себя вниз и сам пробивает себя кольями. 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 ча-

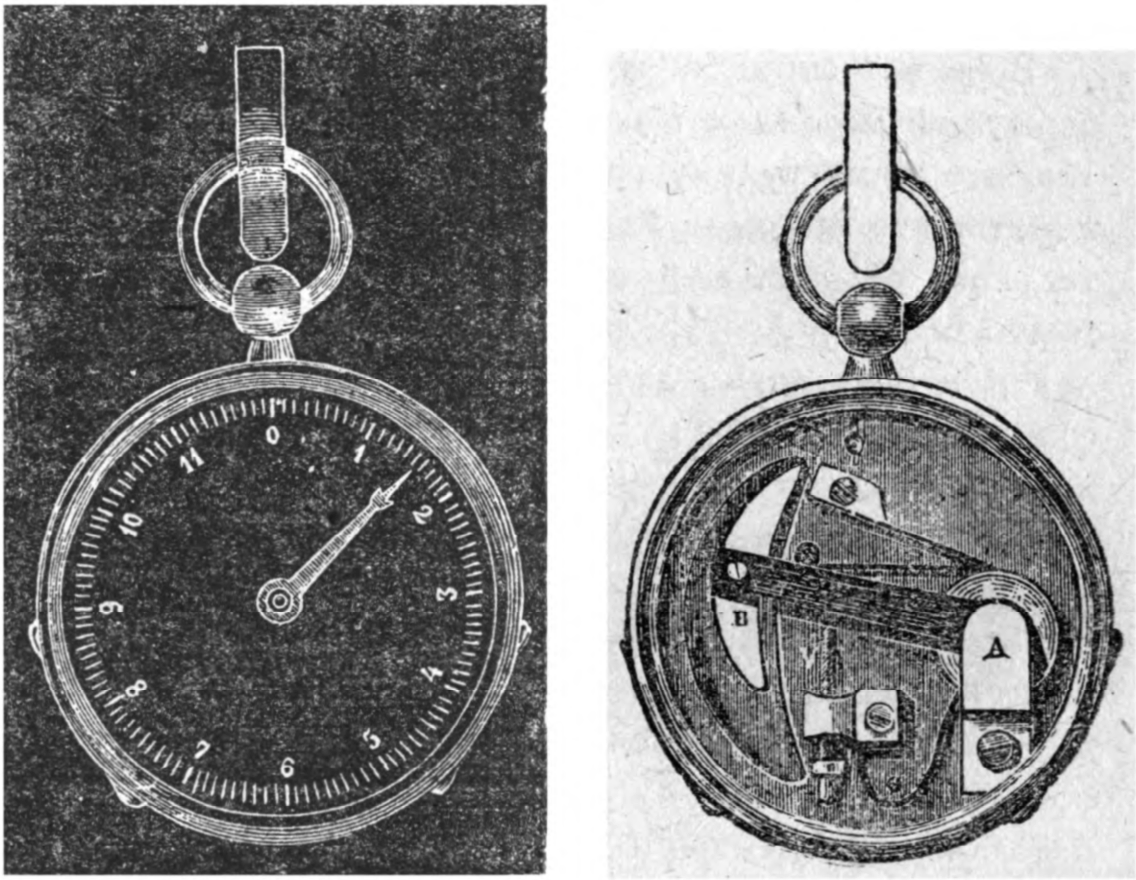



Рис. 80. Шагомер и его устройство.

сов, предназначен для ношения в кармане и служит для автоматического подсчета шагов. На рис. 80 изображен его циферблат и внутреннее устройство. Главную часть механизма составляет грузик *B*, прикрепленный к концу рычага *BA*, который может вращаться около точки *A*. Обычно грузик находится в положении, изображенном на рисунке: слабая пружинка удерживает его в верхней части прибора. При каждом шаге туловище пешехода, а с ним и шагомер немного приподнимаются и затем опускаются. Но грузик *B*, вследствие инерции, не сразу следует за поднимающимся приборчиком и, преодолевая упругость пружины, оказывается внизу. При опускании же шагомера грузик, по той же причине, перемещается вверх. От этого рычаг *AB* при каждом шаге совершает двойное колебание, которое помощью зубчатки двигает стрелку на циферблате и регистрирует шаги пешехода.

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

Шагомер наводит на мысль устроить карманные часы, которые приводились бы в действие повседневными движениями человека. Такие часы недавно изобретены. Их носят на руке, беспрестанные движения которой и заводят их пружину без всяких забот обладателя. Достаточно носить эти часы на руке несколько часов, чтобы они оказались заведенными более чем на сутки. Часы очень удобны: они всегда заведены, поддерживая пружину все время 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.

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

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

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

## ДОБЫВАНИЕ ОГНЯ ТРЕНИЕМ

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

„Каждый из нас взял по две палочки и принялся тереть их одну о другую. Через два часа мы совершенно заледенели; палочки также (дело происходило зимою). Мы горько проклинали индейцев, охотников и книги, которые подвели нас своими советами“.

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

„Я читал много воспоминаний, написанных потерпевшими крушение: все они пробовали этот способ безуспешно. Припоминаю газетного корреспондента, путешествовавшего по Аляске и Сибири. Я однажды встретил его у знакомых, где он рассказывал, как пытался добыть огонь именно трением палки о палку. Он забавно и не-

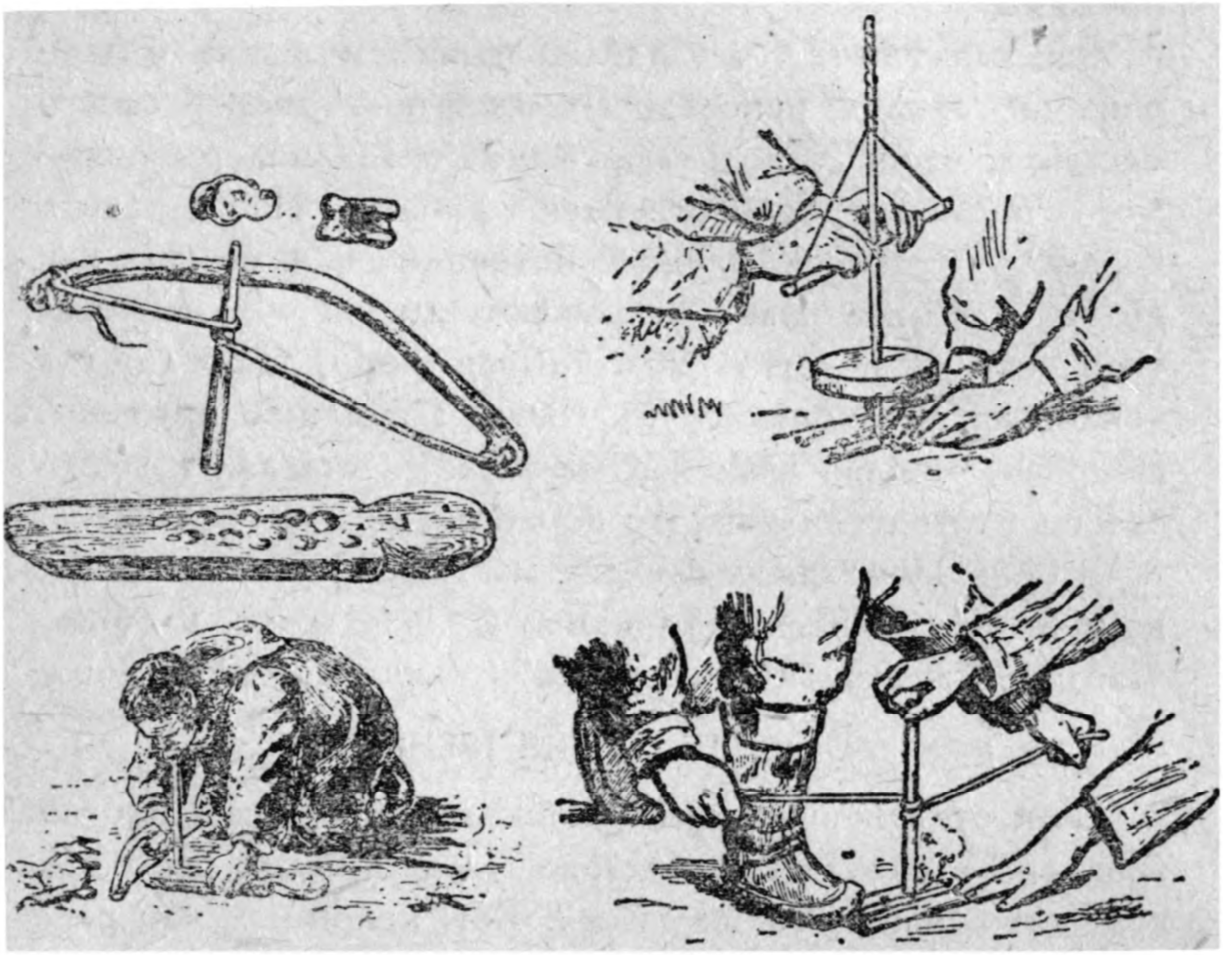


Рис. 81. Как в действительности добывают огонь трением.

подражаемо рассказывал об этом неудачном опыте. В заключение он сказал: „Островитянин южных морей быть может сумеет это сделать; может быть сделает это и малаец. Но это безусловно превышает способности белого человека".

Причина неудач в том, что принимались за дело не так, как следует. Большая часть первобытных народов добывает огонь не простым трением одной палки о другую, а сверлением одной концом другой (рис. 81). Разница между этими способами выясняется при ближайшем рассмотрении.

Пусть палочка $CD$ (черт. 82) движется туда и назад поперек палочки $AB$, делая в секунду два хода с размахом 25 сантиметров. Силу рук, прижимающих палочки, оценим в 2 килограмма (числа берутся произвольные, но правдоподобные). Так как сила трения дерева о дерево составляет около 40% силы, придавливающей трущиеся куски, то действующая сила равна в этом случае $2 \times 0{,}4 = 0{,}8$ кг, а работа ее на пути 50 см составляет $0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}4$ килограммометра. Если бы эта механическая работа полностью превратилась в теплоту, она дала бы

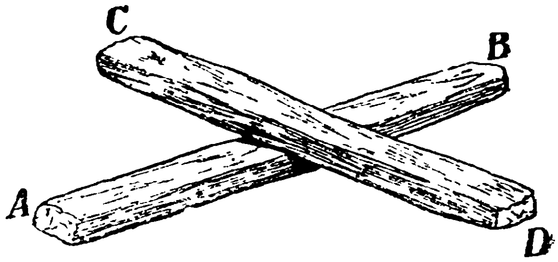


Рис. 82. Книжный способ добывания огня трением.

$$0{,}4 : 2{,}3 = 0{,}17 \text{ малых калорий.}$$ [1]

Какому объему древесины сообщится эта теплота? Дерево—плохой проводник теплоты; поэтому теплота, возникающая при трении, проникает в дерево очень неглубоко. Пусть толщина прогреваемого слоя всего лишь 0,1 мм. [2] Величина трущейся поверхности равна 50 см, умноженным на ширину соприкасающейся поверхности, которую примем равной 1 сантиметру. Значит, возникающей при трении теплотой прогревается объем дерева в

$$50 \times 1 \times 0{,}01 = 0{,}5 \text{ куб. см.}$$

[1] Один килограммометр, превращаясь полностью в теплоту, дает 2,3 малых калорий.

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

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

$$\frac{0{,}17}{0{,}25 \times 0{,}6} = \text{около } 1^\circ.$$

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

Другое дело — сверление (рис. 81). Пусть поперечник конца вращающейся палочки 1 см и конец этот входит в дерево на 1 см. Размах смычка (2 хода в сек.) 25 см, а сила, приводящая его во вращение, — пусть равна 2 килограммам. Секундная работа равна в этом случае тоже $0{,}8 \times 0{,}5 = 0{,}4$ килограммометра, и количество возникающей теплоты 0,17 мал. калорий. Но нагреваемый объем дерева заметно меньше, чем в первом случае: $3{,}14 \times 0{,}01 = 0{,}03$ куб. см, а вес его — 0,015 грамма. Значит, теоретически температура в гнезде палочки должна подняться на

$$\frac{0{,}17}{0{,}015 \times 0{,}6} = 19^\circ.$$

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 воспламенения, достаточно при таком способе

$$250^\circ : 19^\circ = 13 \text{ секунд}.$$

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

## ЭНЕРГИЯ РАСТВОРЕННОЙ ПРУЖИНЫ

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

Но вы поступаете с согнутой пружиной иначе: опускаете в серную кислоту, и она 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

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

края согнутой пружины сближены (по сравнению с распрямленной) на 10 см (0,1 м). Напряжение пружины примем равным 2 кг; значит, **с р е д н я я** величина силы, сгибавшей пружину, равнялась 1 кг. Отсюда потенциальная энергия пружины равна $1 \times 0{,}1 = 0{,}1$ кг/м. Это соответствует количеству тепла $2{,}3 \times 0{,}1 = 0{,}23$ мал. калории. Такое незначительное количество тепла может поднять температуру всего раствора лишь на ничтожную долю градуса, практически неуловимую.

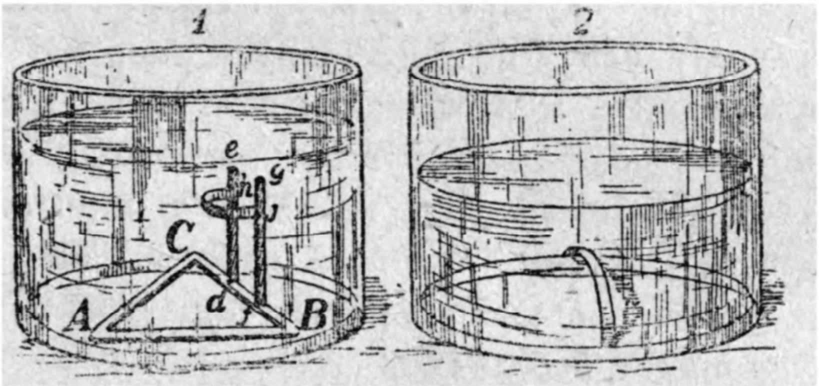



Рис 83. Опыты с растворением пружины.

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

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

Подобный опыт и был произведен (экспериментатор, доктор Гуго Куль, описал его в немецком журнале „Космос"). Стальная полоска в согнутом положении была зажата между двумя стеклянными палочками, установленными на дне стеклянного сосуда в полусантиметре одна от другой. В другом опыте (2) пружина упиралось прямо в стенки сосуда. В сосуд налили серную кислоту (12 ч.

100% кислоты в 1 литре воды). Полоска вскоре лопнула на две части, которые 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.

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.

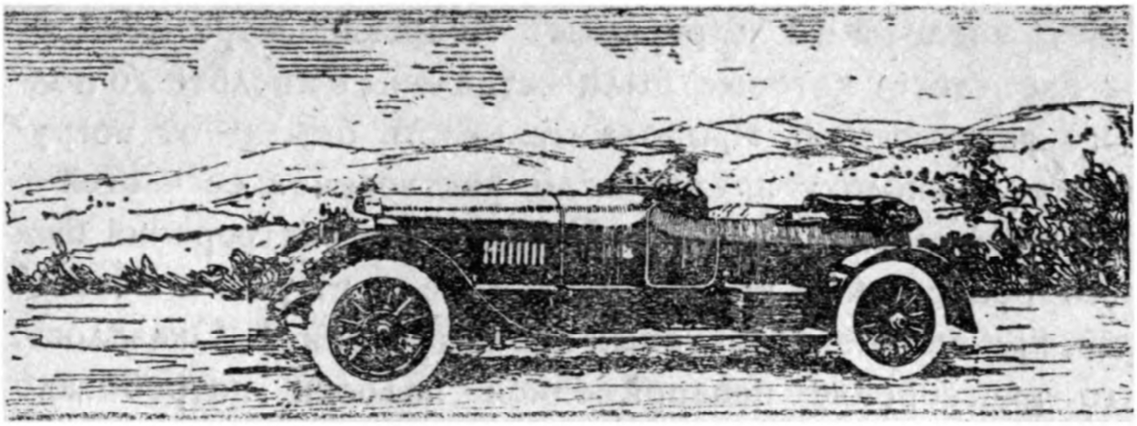


Рис. 84. Какой путь может пройти автомобиль с выключенным мотором?

## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

# ТРЕНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ

### С ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

(Задача)

С ледяной дорожки, наклон которой 30°, а длина 12 метров, скатываются санки и мчатся далее по горизонтальной поверхности. На каком расстоянии они остановятся?

Решение

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

Чтобы вычислить длину этого пути, определим, сколько энергии накопляют санки, скатившись с горы. Высота *AC* (черт. 85), с какой спускаются санки, 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 6 килограммометрам, — при условии отсутствия трения. Трение составляет 0,02 силы $Q$, равной $P$ cos 30°, т. е. $0{,}87P$. Следовательно, преодоление трения поглощает

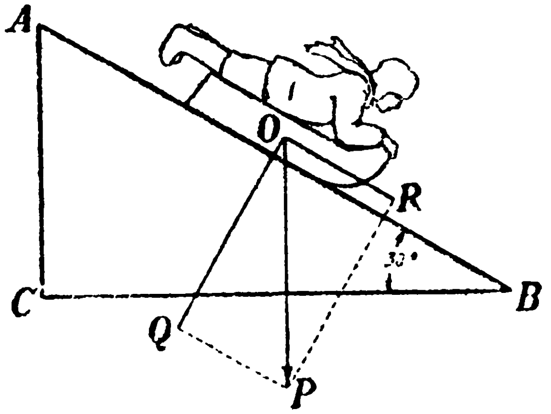


Рис. 85. Как далеко прокатятся санки?

$$0{,}02 \times 0{,}87P \times 12 = 0{,}21P \text{ кг/м};$$

и накопленная кинетическая энергия составляет

$$6P - 0{,}21\,P = 5{,}79\,P \text{ кг/м}.$$

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

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

имеем $x = 290$ метров: сани, соскользнув с ледяной горы, пройдут по горизонтальному пути около трехсот метров.

## С ВЫКЛЮЧЕННЫМ МОТОРОМ

(Задача)

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

### Решение

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

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

Так как вес $P$ автомобиля равен $mg$, где $g$ = ускорение тяжести, то уравнение принимает вид

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

откуда искомое расстояние

$$x = \frac{25\,v^2}{g}.$$

В окончательный результат не входит масса автомобиля; значит, путь, проходимый автомобилем после выключения мотора, не зависит от массы экипажа. Подставив $v = 20$ метров в сек., $g = 9{,}8$ м, получаем, что искомое расстояние равно около 1000 метров: автомобиль проедет по ровной дороге целый километр.

## ТЕЛЕЖНЫЕ КОЛЕСА

Почему у большинства повозок передние колеса делаются меньшего диаметра, чем задние — даже и тогда, когда передок не поворотный и передние колеса не должны подходить под кузов?

Чтобы доискаться правильного ответа, надо вопрос поставить иначе: спрашивать не о том, почему передние колеса меньше, а о том, почему задние больше. Дело в том, что целесообразность малого размера передних колес понятна сама собой: низкое положение оси этих колес придает оглоблям и постромкам наклон, облегчающий лошади вытаскивание телеги из выбоин дороги. Черт. 86

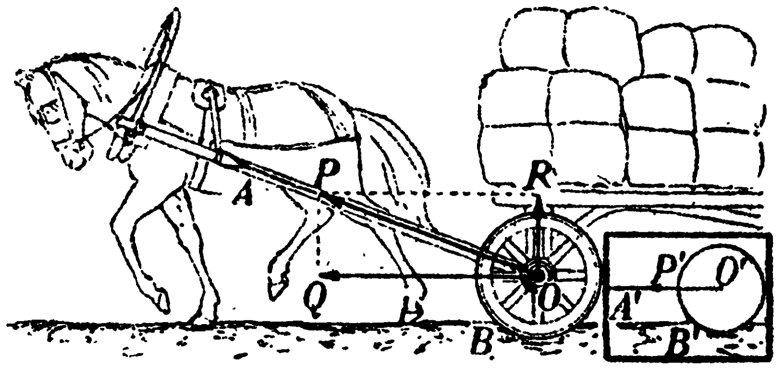



Рис. 86. Почему передние колеса выгодно делать маленькими.

поясняет, почему при наклонном положении оглобли *AO* тяга *OP* лошади, разлагаясь на составляющие *OQ* и *OR*, дают силу (*OR*), направленную вверх и облегчающую вытаскивание воза из выбоины. При горизонтальном же положении оглобель (черт. 86 внизу, направо) не получается силы, направленной вверх; вытащить воз из выбоины тогда трудно. На хорошо содержимых дорогах, где таких неровностей пути не бывает, излишне и низкое положение оси передних колес. Поэтому на Западе чаще, чем у нас, можно видеть повозки с одинаковыми передними и задними колесами.

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 т р е н и е. Трение катящегося тела—

так наз. трение второго рода—обратно пропорционально радиусу. Отсюда ясна целесообразность большого диаметра задних колес.

## НА ЧТО РАСХОДУЕТСЯ ЭНЕРГИЯ ПАРОВОЗОВ И ПАРОХОДОВ?

Согласно механике „здравого смысла“ паровозы и пароходы расходуют свою энергию на собственное передвижение. Между тем, только в первую четверть минуты энергия паровоза затрачивается на приведение его и поезда в движение. Остальное же время (на горизонтальном пути) энергия расходуется только на то, чтобы преодолевать трение и сопротивление воздуха. Как метко заметил один из моих знакомых, энергия трамвайной электростанции целиком расходуется на то, чтобы согревать воздух города, — работа трения превращается в теплоту. Не будь этих помех движению, поезд, разогнавшись в течение первых 10 — 20 секунд, двигался бы по инерции неопределенно долго, не затрачивая энергии.

Мы уже говорили (стр. 21), что движение равномерное совершается без участия силы и, следовательно, без расхода энергии. Если же при равномерном движении происходит трата энергии, то она расходуется 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. В Америке поезд в 400 тонн весом мчится со скоростью 90 километров в час; никакое судно такого же веса не может перемещаться с подобною скоростью. „Гребец, — говорит Вильямс, автор книги „Гляди в корень“, — легко может двигать лодку со скоростью 6 километров в час; но увеличение скорости на 1 км уже напрягает все его силы. А чтобы легкая гоночная лодка скользила со скоростью 20 километров в час, нужна уже отлично тренированная команда из восьми человек, гребущих изо всех сил“.

Если сопротивление воды движению растет очень быстро с увеличением скорости, то и увлекающая сила воды чрезвычайно быстро возрастает со скоростью. Сейчас мы побеседуем об этом подробнее.

## КАМНИ, УВЛЕКАЕМЫЕ ВОДОЮ

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, которые тяжелее ее самой. Правда, это делает не всякая река. Равнинная, медленно текущая река увлекает течением только мелкие песчинки. Но достаточно небольшого увеличения скорости, чтобы весьма заметно усилить увлекающую мощь водяного потока. При удвоенной скорости река не только уносит песчинки, но уже перекатывает крупную гальку. А горный поток, текущий еще вдвое быстрее, увлекает булыжники в килограмм и более весом. Чем объяснить эти явления?

Мы имеем здесь любопытное следствие закона механики, известного в гидрологии под названием „закона Эри“. Закон утверждает, что увеличение скорости течения в $n$ раз сообщает потоку способность увлекать предметы в $n^6$ раз более тяжелые.

Покажем, почему существует здесь такая — весьма редкая в природе — пропорциональность 6-й степени.

Для простоты вообразим каменный кубик с ребром $a$ (рис. 87), лежащий на дне реки. На боковую его грань $S$ действует сила $F$ — напор текущей воды. Она стремится повернуть кубик вокруг ребра $AB$. Этому препятствует сила $P$ — вес кубика в воде, стремящийся повернуть его обратно вокруг того же ребра. Чтобы камень остался в равновесии, необходимо — по правилам механики — равенство „моментов" обеих сил $F$ и $P$ относительно оси $AB$. Моментом силы относительно оси называется произведение величины этой силы на ее расстояние от оси. Для силы $F$ момент равен $Fb$, для силы $P$ — он равен $Pc$ (см. черт. 87). Но

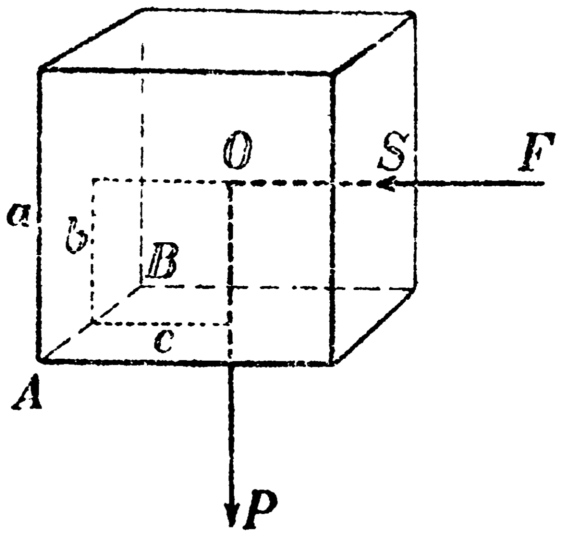



Рис. 87. Силы, действующие на камень в текучей воде.

$b = c = \frac{a}{2}$. Следовательно, камень останется в покое лишь тогда, когда

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

Далее, привлечем формулу $Ft = mv$ (см. 30 стр.), где $t$ — продолжительность действия силы, $m$ — масса воды, участвующая в напоре за $t$ секунд, $v$ — скорость течения.

Масса $m$ воды, притекающая в $t$ секунд к боковой грани $S$, равна $Svt = a^2vt$. Значит,

$$Ft = mv = a^2vt \cdot v = a^2v^2t$$

при $t = 1$, имеем

$$F = a^2v^2.$$

Вес $P$ куба в воде равен его объему ($a^3$), умноженному на удельный вес $d$ его материала, минус вес такого же объема воды (закон Архимеда)

$$P = a^3d - a^3 = a^3(d - 1)$$

Условие равновесия $F = P$ принимает вид

$$a^2v^2 = a^3(d-1),$$

откуда

$$a = \frac{v^2}{d-1}.$$

Ребро ($a$) куба, могущего противостоять потоку, скорость которого $v$, пропорционально второй степени скорости ($v^2$). Вес же куба, мы знаем, пропорционален третьей степени его ребра ($a^3$). Следовательно, вес увлекаемых водой каменных кубов возрастает с 6-й степенью скорости течения, так как $(v^2)^3 = v^6$.

В этом и состоит „закон Эри". Мы вывели его для камней кубической формы, но не трудно обобщить вывод для тел любой формы.

Для уяснения 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 $1:2^6:4^6 = 1:94:4096$. Вот почему, если спокойная река увлекает только песчинки в $^1/_4$ грамма весом, то вдвое более быстрая река может увлекать камешки до 16 граммов, а еще вдвое более быстрая горная река способна уже перекатывать камни в целый килограмм.

## СКОРОСТЬ ДОЖДЕВЫХ КАПЕЛЬ

Косые линии дождевых струй на оконных стеклах движущегося вагона 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, что результирующее движение получается здесь **п р я м о л и н е й н о е**. Но одно из слагающих движений (движение поезда) — равномерное. Механика учит, что в таком случае и другое составляющее движение, т. е. падение капель, должно быть тоже 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).

Рис. 88. Косые струи дождя в окне вагона.

Итак, дождевые капли падают не с ускорением, как уроненный камень, а равномерно. Причина та, что сопротивление воздуха нацело уничтожает силу, порождающую ускорение. Если бы этого не было, если бы воздух не задерживал падения дождевых капель, последствия были бы для нас довольно плачевны. Дождевые облака парят нередко на высоте 1—2 километров; падая с высоты 2000 метров в несопротивляющейся среде, капли достигали бы земной поверхности с секундной скоростью

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 2000} = 280 \text{ м.}$$

Это — скорость револьверной пули. И хотя пули здесь не свинцовые, а только водяные, несущие с собой в 10 раз меньше кинетической энергии, все же не думаю, чтобы подобный обстрел мог быть приятен.

С какою же скоростью дождевые капли в действительности достигают земли? Мы сейчас займемся этим, но прежде объясним, почему капли дождя движутся равномерно.

Сопротивление, испытываемое падающим телом со стороны воздуха, не остается 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 с тем вместе растет и сопротивление, задерживающее рост скорости.[2] Падение остаётся ускоренным, но величина ускорения меньше, чем при свободном падении. В дальнейшем ускорение продолжает уменьшаться и, наконец, становится равным нулю: тело с этого момента движется без ускорения, т. е. равномерно. И так как скорость больше не возрастает, 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 скорости дождевых капель показали, что она весьма невелика, в особенности для капель мелких. Для капелек в 0,03 миллиграмма она равна 1,7 метрам, для 20-миллиграммовых — 7 метрам, а для самых крупных, весом 200 мг, скорость достигает 8 метров; большей скорости не наблюдалось.

Очень остроумен способ измерения скорости дождевых капель. Прибор (рис. 89) 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 вра-

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

[2] При скорости от нескольких метров в сек. до 330 м (скорость звука) сопротивление воздуха растет пропорционально квадрату скорости.

щение и убирают зонт. Капли дождя, проходя через прорез, падают на нижний круг, устланный пропускной бумагой. За время, в течение которого капля движется между дисками, они успевают повернуться на некоторый угол, и следы капель, упавших на нижний круг, окажутся не прямо под прорезом, а несколько позади. Пусть, например, след капли отстал на 20-ю долю окружности, а круги 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 до 20 оборотов в минуту, успевает повернуться на 20-ю долю оборота. Этот промежуток времени равен

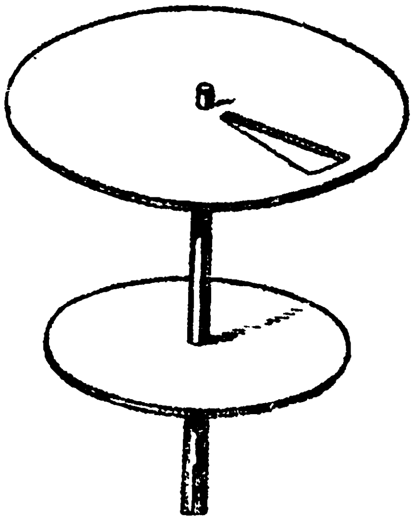


Рис. 89. Прибор для измерения скорости дождя.

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

В 0,15 сек. капля прошла 0,4 м; значит, секундная скорость падения капли равна

$$0{,}4 : 0{,}15 = 2{,}6 \text{ метра.}$$

Что касается в е с а капель, то он вычисляется по размеру влажных пятен, получающихся при падении капель на пропускную бумагу. Сколько миллиграммов воды всасывает 1 кв. см бумаги, определяют предварительно.

Градины падают с большею скоростью, чем дождевые капли. Это объясняется не тем, конечно, что градины плотнее воды (наоборот, вода плотнее), а тем, что они до-

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 метрах | 1,7 | 2 | 2,3 | 2,6 | 3,3 | 5,6 | 6,9 | 7,1 |

стигают бо́льшей величины. Но и они падают близ земли с равномерною скоростью.

Даже брошенные с аэроплана шрапнельные пули (свинцовые шарики около 1,5 см в диаметре) достигают земли с равномерной и довольно умеренной скоростью; они поэтому почти безвредны — неспособны пробить мягкую шляпу. Зато уроненные с такой же высоты железные „стрелки“ представляют грозное оружие, пробивающее продольно туловище человека навылет. [1] Объясняется это тем, что на кв. см поперечного сечения стрелки приходится гораздо бо́льшая масса, нежели в круглой пуле; как выражаются артиллеристы, „поперечная нагрузка“ стрелки значительнее, чем пули, благодаря чему стрелка успешнее преодолевает сопротивление воздуха.

## ЗАГАДКА ПАДЕНИЯ ТЕЛ

Такое общеизвестное явление, как падение тел, дает нам поучительный пример резкого расхождения обыденных и научных представлений. Люди, не знакомые с механикой, убеждены в том, что тела тяжелые падают

[1] 10-граммовая пуля имеет конечную скорость, при падении с высоты более 5 км, около 40 м в сек., стрела же весом около 30—40 г — метров 200.

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 несравненным популяризатором:

„Аристотель учит, что различно тяжелые тела движутся в одной и той же среде с различными скоростями, прямо пропорциональными весу тел, так что тело, например, в 10 раз тяжелее другого, движется в десять раз скорее... Достаточно краткого размышления, чтобы убедиться в неправильности учения Аристотеля. Пусть даны нам два тела, скорости которых различны. Соединим оба тела в одно: тогда движение быстрейшего должно замедляться движением менее быстрого. Возьмем большой камень, скорость которого 8 локтей, и другой, малый, скорость которого пусть только 4 локтя. Соединим их вместе. По доказанному скорость их совокупного движения будет менее 8 локтей. Но ведь оба камня, сложенные вместе, составляют один камень, больший того, скорость которого равна 8 локтям; следовательно, больший камень должен двигаться медленнее малого, что прямо противно нашему предположению. Вот каким образом из предположения, будто больший груз движется скорее, чем меньший, я прихожу к выводу, что больший груз движется медленнее".

Теперь мы твердо знаем, что в пустоте все тела падают с одинаковой скоростью и что причина, обусловливающая различную скорость падения тел в воздухе, есть его сопротивление. Здесь, однако, возникает недоумение такого рода: сопротивление воздуха движению зависит только от размеров и от формы тела; казалось бы поэтому, что два тела, одинаковые по величине и по форме, но разного веса, должны падать с одинаковой скоростью: их скорости, равные в пустоте, должны одинаково уменьшиться действием воздушного сопротивления. Железный и деревянный шары одинакового диаметра должны падать одинаково быстро, — вывод, явно не отвечающий фактам.

Как выпутаться из этого конфликта теории и практики?

Воспользуемся мысленно услугами аэродинамической трубы (глава I), 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, тела̀ не получат одинакового 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 деревянный.

Сказанное объясняет, между прочим, и то, почему артиллеристы придают столь большое значение „поперечной нагрузке“ снаряда, то есть той доле его массы, которая приходится на каждый кв. см, подверженный сопротивлению воздуха (ср. стр. 157).

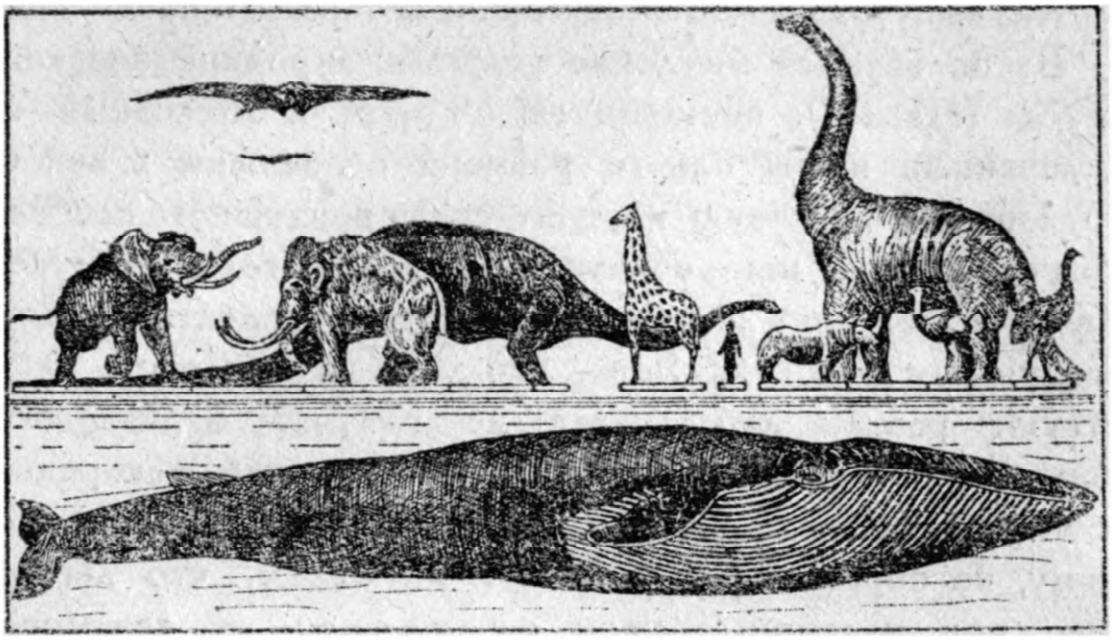


Рис. 90. Крупнейшие наземные животные в сравнении с китом. Слева — африканский слон (3,5 м высоты); вверху — орел-тетеревятник (2,2 м), над ним птеранодон (8,4 м), вправо — мамонт (4 м высоты), диплодок (22 м длины), жирафф (5 м высоты), человек (1,7 м), носорог (1,6 м), брахиазавр (11 м высоты), страус (2,5 м), моа (3,5 м).

## 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 могучее нормального человека, но, напротив, должны были быть относительно во столько же раз слабее.

Пусть рядом стоят Гулливер и великан в 12 раз выше его. Оба поднимают вверх правую руку. Вес руки Гулливера $p$, великана — $P$. Первый поднимает центр тяжести своей руки на высоту $h$, второй — на $H$. Значит, Гулливер совершает работу $ph$, великан — $PH$. Найдем соотношение между этими величинами. Вес $P$ руки великана больше веса $p$ руки Гулливера во столько раз, во сколько больше ее объем, т. е. в $12^3$ раз. Высота же $H$ больше $h$ в 12 раз. Итак,

$$P = 12^3 \times p$$
$$H = 12 \times h.$$

Отсюда $PH = 12^4 ph$, — т. е. для поднятия руки великан должен выполнить работу в $12^4$ раз большую, чем человек нормальных размеров. Наделен ли великан соответственно большею работоспособностью? Для этого обратимся к сравнению мускульной силы обоих существ и прежде всего прочтем относящееся сюда место из курса физиологии: [1]

„В мышце с параллельными волокнами высота, до которой поднимается тяжесть, зависит от длины волокна вес же поднимаемого при этом груза зависит от числа волокон, так как тяжесть распределяется между ними Поэтому из двух мышц одинаковой длины и качества бо́льшую работу производит та, которая обладает большей площадью сечения, а из двух мышц с одинаковой площадью сечения — та, которая длиннее. Если же для сравнения взяты две мышцы различной длины и площади сечения, то производимая ими работа больше для той из них, которая обладает бо́льшим объемом, т. е. содержит больше кубических единиц".

Прилагая сказанное к нашему случаю, заключаем, что способность производить работу у великана должна

[1] „Учебник физиологии" Фостера.

быть больше, чем у Гулливера, в $12^3$ раз (отношение объемов мышц). Обозначив работоспособность Гулливера через $w$, а великана через $W$, имеем соотношение

$$W = 12^3\ w.$$

Значит, великан, поднимая свою руку, должен выполнить работу в $12^4$ раз большую, чем Гулливер, а 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 $3\frac{1}{2}$ раза больше, чем в теле пропорционально сложенного человека. К тому же и кости, несущие такие утолщенные мышцы, должны быть соответственно массивнее. Думал ли Свифт, что созданные его воображением великаны должны по тяжеловесности и неуклюжести 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 метра длины) с мелким грызуном леммингом (15 см. длины). Наружные формы их тела приблизительно подобны. Но мы уже убедились, что животные, геометрически подобные, не могут обладать одинаковой свободой движений. Если бы мускулы бегемота были геометрически подобны мускулам лемминга, бегемот был бы относительно слабее лемминга в

$$\frac{400}{15} = 27 \text{ раз.}$$

Чтобы сравниться с леммингом в подвижности, мускулы бегемота должны быть в 27 раз объемистее сверх того,

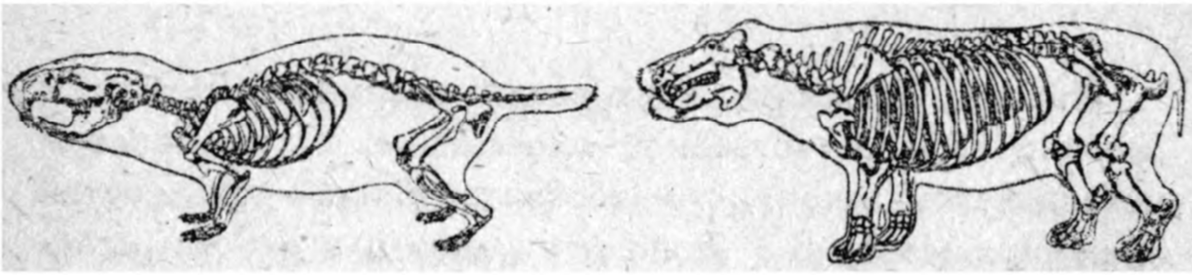


Рис. 91. Скелет бегемота (направо), сопоставленный со скелетом лемминга, при чем кости бегемота по длине уменьшены до размеров костей этого грызуна. Бросается в глаза непропорциональная массивность костей бегемота.

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. Тепе́рь понятно, почему бегемот так неуклюже толстомяс и обладает таким массивным скелетом. Рис. 91, на котором представлены в одинаковых размерах скелет и наружные очертания обоих животных, наглядно убеждает в сказанном. А следующая таблица подтверждает, что в животном мире наблюдается общий закон, в силу которого чем крупнее животное, тем больший процент его веса составляет скелет.

| МЛЕКОПИТАЮЩИЕ | ВЕС СКЕЛЕТА | ПТИЦЫ | |
|---|---|---|---|
| Землеройка | 8% | Королек | 7% |
| Домашняя мышь | 8,5% | Домашняя кура | 12% |
| Кролик | 9% | Гусь | 13,5% |
| Кошка | 11,5% | | |
| Собака (средн. разм.) | 14% | | |
| Человек | 18% | | |

## СТРОЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЖИВОТНЫХ

Многие особенности строения наземных животных находят себе естественное объяснение в том простом механическом законе, что работоспособность конечностей пропорциональна 3-й степени их длины, а работа, необходимая для управления ими,—4-й степени. Поэтому, чем крупнее животное, тем короче его конечности — ноги, крылья, щупальцы. Длинные конечности мы видим только у самых мелких из наземных животных. Всем известный паук-сенокосец может служить примером таких длинноногих существ. Законы механики не препятствуют существованию подобных форм, пока размеры их весьма невелики. Но такое же животное при величине, скажем, с лисицу было бы механически невозможно: ноги не выдержали бы груза туловища и лишены были бы подвижности. Только в океане, где вес животного уравновешивается выталкивающим действием воды, могут существовать подобные животные формы; например, глубоководный краб м а к р о х е й р а при поперечнике тела полметра обладает ногами в 3 метра 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 „Рассуждения о двух новых науках“, где заложены были основы механики, он уделяет место таким темам, как „Животные и растения чрезмерной величины“, „Кости великанов“, „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 вот мы видим, как исполинские животные древних геологических эпох одно за другим сходят с арены жизни. Из всего разнообразия форм, созданных природой в крупном масштабе, лишь немногие дожили до наших дней. Наиболее крупные — например, исполинские пресмыкающиеся — оказались нежизнеспособными. В числе причин, обусловивших вымирание исполинов древней истории Земли, сейчас указанные законы механики занимали одно из самых видных мест. Кит не может итти в счет: он живет в воде, в условиях невесомости, и все сейчас сказанное к нему не относится (ср. рисунок 90, страница 160).

Рис. 92. Исполин древних геологических эпох, перенесенный на улицу современного города.

Можно поставить вопрос: если большие размеры так невыгодны для жизни организма, то почему эволюция не шла в направлении измельчания животных форм? Причина та, что крупные формы все же 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 все же будем иметь груз, в 144 раза больший, чем посильный Гулливеру. Теперь понятно, что в борьбе крупных животных форм с мелкими у первых имеется заметное преимущество. Но выгодный при схватках с врагами большой рост ставит животное в неблагоприятные условия в других отношениях (добывание пищи).

## КТО ЛУЧШЕ ПРЫГАЕТ?

Многих изумляет прыжок блохи, в сотню раз превосходящий ее рост (до 40 см); нередко высказывают мнение, что человек мог бы состязаться с блохой лишь в том случае, если бы способен был подпрыгивать на высоту $1{,}7 \times 100$, т. е. на 170 метров.

Рис. 93. Если бы человек прыгал, как блоха...

Механический расчет восстановляет репутацию человека. Для простоты будем считать тело блохи геометрически подобным телу человека. Если блоха весит $p$ кг и подпрыгивает на $h$ метров, то она совершает при каждом прыжке $ph$ килограммометров работы. Человек же совершает при прыжке $PH$ кг/м, если $P$—вес его тела, а $H$—высота его прыжка (вернее—высота подъема его центра тяжести). Так как человек примерно раз в 300 выше блохи, то вес его тела можно принять равным $300^3 p$, и, следовательно, работа прыжка человека равна $300^3 pH$. 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 (см. стр. 162). Поэтому мы в праве требовать у него затраты энергии лишь в $300^3$ большей. Но если

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

то должно существовать равенство:

$$300^3 \cdot \frac{H}{h} = 300^3, \text{ откуда } H = h.$$

Следовательно, человек сравнится с блохой в искусстве прыгать даже в том случае, если поднимет центр тяжести своего тела на одинаковую с ней высоту, т. е. сантиметров на 40. Подобные прыжки мы делаем без напряжения, и, следовательно, нисколько не уступаем блохе в прыганьи.

Если этот расчет покажется вам недостаточно убедительным, вспомните, что, подпрыгивая на 40 см, блоха поднимает только свой ничтожный вес. Человек же поднимает груз в $300^3$, т. е. в 27 000 000 раз больший. Двадцать семь миллионов блох, прыгающих одновременно, подняли бы совместно груз, равный весу человеческого тела. Только такой прыжок—армии из 27 000 000 блох— и надо сравнивать с прыжком одного человека. И тогда сравнение окажется несомненно в пользу человека, так как он может прыгнуть и выше 40 сантиметров.

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:

| | | |
|---|---|---|
| кузнечик прыгает на | 30 | -кратную длину тела. |
| тушканчик „ „ | 15 | -кратную длину тела. |
| кенгуру „ „ | 5 | -кратную длину тела. |

## КТО ЛУЧШЕ ЛЕТАЕТ?

Если мы желаем правильно сравнивать способность различных животных к летанию, мы должны помнить, что действие удара крыла обусловлено сопротивлением воздуха; последнее же, при равных скоростях движения крыла, зависит от величины его поверхности. Эта поверхность, при увеличении размера животного, растет пропорционально второй степени линейного увеличения, поднимаемый же груз (вес тела) возрастает пропорционально третьей степени линейного увеличения. Нагрузка на 1 кв. см крыла поэтому повышается с увеличением размеров летуна. Орлы страны великанов (в „Путешествии Гулливера") должны были нести на кв. см своих крыльев 12-кратный груз, по сравнению с обыкновенными орлами, и были, конечно, гораздо худшими летунами, нежели миниатюрные орлы страны лиллипутов, несшие нагрузку в 12 раз меньше нормальной.

Переходя от воображаемых животных к реальным, приведем следующие числовые данные о нагрузке, приходящейся на 1 кв. см крыльев (в скобках — вес животного):

Насекомые

| | |
|---|---|
| Стрекоза (0,9 г) | 0,04 г |
| Бабочка-шелкопряд (2 г) | 0,1 „ |

Птицы

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

Мы видим, что чем крупнее летающее животное, тем бо̀льшая нагрузка приходится на кв. см его крыльев. Ясно, что для увеличения тела птицы должен существовать предел, превзойдя который птица не может уже поддерживать себя крыльями в воздухе. И не случайно то, что самые крупные птицы лишены способности летать. Такие исполины пернатого мира, как казуар, достигающий человеческого роста, страус (2,5 метров) или еще более крупная вымершая мадагаскарская птица эпиорнис (5 метров) неспособны летать; летали лишь их отдаленные менее крупные предки, впоследствии, из-за недостатка упражнения, утратившие эту способность и с тем вместе получившие возможность увеличить свой рост.


Рис. 94. Страус (2) рядом со скелетом вымершей мадагаскарской птицы — эпиорниса (1). Внизу (3) для сравнения — курица.

## 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 при ударе прекращают свое движение, верхние еще продолжают двигаться и оказывают на нижние сильное давление. Это и есть то „сотрясение", ко-

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

торое гибельно для организма крупных животных. 1728 лиллипутов, упав с дерева дождем, пострадали бы мало; но если бы те же лиллипуты упали плотным комом, то расположенные выше раздавили бы нижних. Человек нормального роста представляет собою словно такой ком из 1728 лиллипутов.

Такова первая причина безвредности падения мелких существ. Вторая кроется в большей гибкости их частей. Чем стержень или пластинка тоньше, тем больше 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 возрастет при этом в $100^3$, т. е. в 1 000 000 раз. Сопротивление же ствола раздроблению, зависящее от площади его сечения, увеличится только в $100^2$, т. е. 10 000 раз. На каждый кв. см 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, вы-

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

сокое 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".

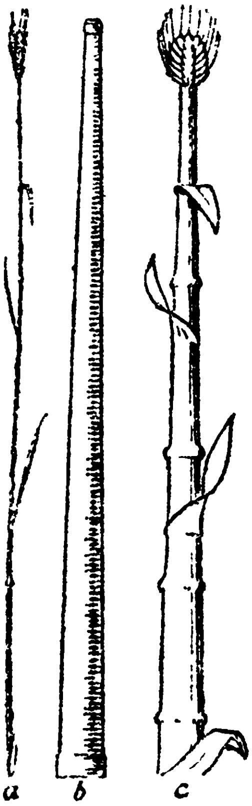


Рис. 95. Стебель ржи (*a*), заводская труба (*b*) и воображаемый стебель в 140 м высоты (*c*).

Нас поражает необыкновенная прочность соломины, достигающей, например, у ржи $1^1/_2$ метра высоты при ничтожной толщине 3 мм. Самое стройное сооружение строительного искусства — труба одного из заводов близ Фрейберга — достигает 140 метров высоты при среднем поперечнике 5,5 метра. 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 в виду сложности), что если бы природе понадобилось создать ствол в 140 метров высоты по типу ржаной соломины, то поперечник его должен был бы быть около 3 метров: 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 стебель ржи ($1^1/_2$ метра) превышает его толщину в 500 раз, то у бамбука (30 м) это отношение равно 130, у сосны (40 м)—42, у эвкалипта (130)—28.

По сходным причинам ветви и листья также не могли бы быть увеличены пропорционально высоте ствола: сопротивление ветвей и листовых черешков разрыву возрастает пропорционально квадрату линейного увеличения (площади сечения), а их вес—пропорционально его кубу (объему). Поэтому то пестрое разнообразие форм, которое мы наблюдаем у мелкой травянистой растительности, механически невозможно в большом масштабе. Луговые или полевые растения не могли бы существовать в виде лесных исполинов.

## ИЗ КНИГИ ГАЛИЛЕЯ

Эту часть книги закончим отрывком из сочинения основателя механики Галилея, впервые поставившего на обсуждение рассматриваемые нами вопросы в своей написанной незадолго до смерти книге „Рассуждения о двух новых учениях в механике и движениях". Книга написана в форме беседы трех лиц, из которых Сальвиати высказывает мысли автора.

### *О ПРЕДЕЛАХ РАЗМЕРОВ ЖИВОТНЫХ*

Сальвиати. Ни искусство, ни наука не могут творить свои машины необычайной величины, и, например, невозможно строить страшно огромные корабли, дома и храмы, в которых балки, столбы, своды, железные связи и прочие части не грозили бы изломом от собственной тяжести. Природа не решается произрастить дерево чрезмерной величины потому, что его ветви под грузом собственной тяжести не преминули бы обломиться. Нельзя было бы существовать и производить настоящие их движения людям и животным, если бы они приняли огромный рост и при этом форма их увеличенных костей осталась подобною нынешней; или веществу этих костей следовало бы измениться, сделаться плотнее и устойчивее, или же эти кости должны были бы безобразно утолститься. Но в этом случае фигура и наружность животного сделалась бы уродливою, — важная истина, которую заметил мой любимый поэт, когда наблюдательный гений его изобразил наружность Гиганта:

Огромный рост его так члены утолщает,
Что вид чудовища они ему дают.[1]

Но вот самый лучший пример того, что я говорю.

Пусть кость животного (рис. 96) удлинилась только в три раза и стала толще в гораздо большее число раз, а именно во столько, чтобы в большом животном, которому принадлежит, она могла совершать отправление, соразмерное отправлению подобной кости в малом животном. Взгляните, какую неуклюжую форму имеет утолщенная часть. Не ясно ли, что для сохранения соразмерности членов, отличающей нормального человека, члены в теле великана или должны отличаться большею плотностью и сопротивляемостью, или же быть относительно непрочными и слабыми в сравнении с членами человека обыкновенного роста; великан, чем выше ростом, тем более был бы удручен тяжестью своего тела и падал. Наоборот, мы видим, что по мере уменьшения величины животных их сила не только сравнительно не уменьшается, но увеличивается в большей и большей пропорции. Я уверен, что небольшая собачка может выдержать на спине своей двух или трех таких же собачек, но не думаю, чтобы лошадь выдержала даже одну равную себе.

Симпличио. Если это так, большой повод к сомнению дают мне огромные рыбы, например, кит, кото-

[1] Ариост в „Неистовом Орланде“.

рый по объему, я думаю, раз в десять больше слона и все-таки создан природою.

Сальвиати. Ваше сомнение, синьор Симпличио, аставляет меня вспомнить оговорку, которую я позабыл сделать. Действительно, могут огромные животные существовать и двигаться не хуже малых, и при этом не всегда необходимо, чтобы кости и другие части тела, назначение которых выносить собственную и случающуюся внешнюю тяжесть, были очень крепки: оставив в покое утолщение или уплотнение костей, иногда мы видим, что, напротив, существование огромных животных возможно и при уменьшении плотности костей или мяса, лежащего на этих костях. Эту-то вторую задачу исполнила природа в рыбах, снабдив их скелетом и плавниками не только весьма легкими, но даже лишенными веса.

Рис. 96. (Из книги Галилея).

Симпличио. Догадываюсь, к чему клонится ваша речь: вы хотите сказать, что рыбы живут в воде, плотность которой убавляет вес всякого тела, погруженного в нее; по этой причине тело рыб, лишаясь веса, может существовать без того, чтобы кости становились плотнее. Но этого не довольно, потому что, хотя мясо рыбы не тяготеет, зато несомненно тяготеют ее кости. Кто усомнится, что китовое ребро, похожее на огромную доску, в воде пойдет ко дну? Как же не ломается такое ребро?

Сальвиати. Ваше возражение остроумно, но позвольте вас спросить, разве вам не случалось видеть, что рыбы то опускаются ко дну, то стоят неподвижно среди воды, то поднимаются на ее поверхность и при этом не употребляют в дело своих плавников?

Симпличио. Случалось, но что же из этого следует?

Сальвиати. Эта способность рыб держаться неподвижно в любом месте воды самым очевидным образом доказывает, что вес их тела равняется весу равного объема воды, так что, хотя некоторые вещества, входящие в состав их тела, тяжелее воды, зато другие легче ее. Следовательно, если кости тяжелее воды, то нервы и прочие ткани непременно легче ее и действуют своею легкостью наперекор тяжести костей. Таким образом в водяных животных имеется прямо противное тому, что мы замечаем в животных сухопутных: в последних обязанность выносить тяжесть тела лежит на костях, а в первых на мясе, которое выносит свою тяжесть и тяжесть костей. Итак, не удивляйтесь, что в воде существуют огромные животные, а на земле или в воздухе их не существует.

Сагредо. Теперь мне понятно, что великан морей, будучи вытащен на сушу, пожалуй недолго останется невредимым, потому что кости его не вынесут тяжести тела, которое треснет во многих местах.

Сальвиати. Полагаю, что так, и кроме того уверен, что громадное судно, собственную тяжесть которого увеличивает огромный груз товара, в воде крепко, а на суше, со всех сторон окруженное воздухом, может развалиться.

Рис. 97. В мире № 1. Колеса оставались сплюснутыми сверху вниз.

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

# ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ПРОГУЛКА В СТРАНУ ЭЙНШТЕЙНА

*Очерк О. А. Вольберга*

### ВСТУПИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Имеется много прекрасных книг, в которых теория относительности излагается более или менее общедоступно. Но, надо сказать правду, эти книги немногим принесли действительную пользу.

Популяризаторы теории относительности обычно связывают крепко читателя логическими доводами и влекут покорным пленником в страну Эйнштейна. Понять эти доводы нетрудно, но принять выводы, которые отсюда проистекают, читатель все-таки не может. Логика увлекает мысль в новый мир, а слабое воображение останавливается бессильно на его пороге.

Наши понятия и представления сложились под влиянием тех обыденных фактов, среди которых мы живем. Эйнштейн утверждает, что эти понятия и представления соответствуют фактам только приближенно. Ответственной за такое несовпадение является грубость нашего восприятия: мы не замечаем некоторых изменений, которые происходят в действительности. Если бы изменения эти были более значительны, мы обнаружили бы их,—и тогда представление наше о мире было бы существенно иным.

Вообразим страну, где все происходит, как в нашем мире, но где особенности, о которых говорит Эйнштейн, выступают более отчетливо. Перенесемся на время в эту страну, поживем там среди новых фактов, научимся смотреть на вещи глазами коренных ее обитателей. Это лучший способ усвоить те новые понятия и представления, которые составляют сущность теории относительности.

Таково будет содержание этой главы: мы намерены изучить теорию относительности экскурсионным методом. Но прежде чем явиться в страну Эйнштейна, полезно заглянуть в другой мир, в некоторых отношениях более простой. Короткая остановка здесь подготовит нас к вступлению в „землю обетованную".

## *ЧАСТЬ I*

## *МИР НОМЕР ПЕРВЫЙ*

### *I. НЕОБЫЧАЙНЫЕ ПРИКЛЮЧЕНИЯ МИСТЕРА ГАРВУДА*

Прямое как стрела, широкое и ровное шоссе позволяло моему лимузину развить скорость километров 70. Я рассчитывал за два часа проделать путь до столицы, где должен был видеться с профессором N, назначившим мне свидание ровно в три. Было около полудня, и в моем распоряжении оставалось достаточно времени. Вещи были уложены на автомобиле. Мистер Барнэй — добродушный хозяин гостиницы, в которой я жил,—любезно проводил меня и сказал:

— До свидания, мистер Гарвуд. Возвращайтесь поскорее. О продовольствии на дорогу я позаботился. Вы найдете все необходимое в этой корзине.

Корзина была внушительных размеров. Двухчасовая прогулка, как видно, представлялась этому добряку настоящим путешествием.

— В два часа я буду в столице, — возразил я. — До трех я свободен и успею пообедать. Ваши хлопоты о провизии, право, совершенно излишни.

— Да, разумеется, — ответил он, как мне показалось, с некоторым удивлением, — в городе вы успеете пообедать вторично. В корзинку я положил лишь скромный дорожный обед: хлеб, жареную телятину, бутылку молока, фрукты. Бензина у вас достаточно: наполнены оба бака.

Чудак, считавший меня способным дважды обедать в течение трех часов, преувеличивал аппетит и моего автомобиля. Но не хотелось спорить. Поблагодарив и откланявшись, я тронулся в путь.

Было ровно 12. Тихо, солнечно, сухо, но не жарко. Прекрасная погода для поездки. Мотор работал отлично. Но странное дело: мне почудилось, что я еду не так быстро, как ожидал. Измеритель скорости показывал 75 километров, я чувствовал привычный ветер от рассекаемого воздуха, но не было мелькания дороги, а окрестности как-то слишком медленно уходили назад. Первый километр показался мне ужасно длинным. Я стал присматриваться. Машина работала прекрасно, и все-таки окрестности медленно ползли мимо меня. Казалось, кто-то растянул дорогу с садами, домами, полями и километрами.

К часу дня не проехал и 30 километров. Нечего было и думать поспеть во-время на свидание. Сбитый с толку, сидел я в лимузине, тщетно стараясь понять, что происходит. В три часа я почувствовал голод и вспомнил о хозяине, который словно предвидел мое непонятное приключение.

В 5 часов вечера я начал опасаться, что не хватит бензина. Наконец, вдали показался город. Было около

6 часов, когда я подъехал к гостинице, где заранее была заказана комната и обед. Никто не осведомился о причине моего опоздания. Мало того: хозяин извинился, что обед не готов.

— Мы ждали вас к двум,—сказал он.—Вы приехали немного раньше.

— Раньше?! Теперь без 10 минут шесть.

Я протянул ему часы. Он осмотрел их и сказал совершенно серьезно:

— Прекрасные часики; у них, должно быть, очень точный ход. Вы выехали в 12?

— Да...

— Теперь без пяти минут 2. Вы делали 75 километров в час.

Затем этот чудак (неужели все содержатели гостиниц чудаки?) подошел к какому-то чертежу на стене, приложил линейку, что-то отмерил и сказал:

— Да, совершенно точный ход.

Это относилось к моим часам и было произнесено без тени иронии. Переставив стрелки, он вернул мне часы.

Пообедав вторично, с изрядным аппетитом, я отправился на свидание к профессору, который выразил удовольствие по поводу моей аккуратности.

Ничего не понимая, я вернулся в гостиницу.

Мои дела в столице были закончены, и я решил, несмотря на усталость, немедленно ехать назад.

— Мы ничего не приготовили вам на дорогу,—сказал хозяин гостиницы.—Будьте любезны подождать несколько минут.

— Отпустите, пожалуйста, бензин для автомобиля, провизии мне не нужно,—ответил я.

Увы! В дороге пришлось пожалеть об этом легкомысленном заявлении.

Обратное путешествие как две капли воды походило на утреннее. Снова дорога казалась растянутой. Время тянулось страшно медленно. Навстречу попался крестьянин с телегой. Меня поразил его вид: лошадь была непомерно длинна, возница сначала показался мне довольно худощавым, но когда, проезжая мимо, я взглянул на него сбоку, то видно было, что он каррикатурно толст от груди к спине и непомерно узок в плечах. Колеса имели эллиптическую форму, казались сплюснутыми сверху вниз и отличались непостижимой гибкостью, так что, катясь, оставались все время сплюснутыми (рис. 97). Случайные прохожие были так же уродливы, как этот крестьянин, и напоминали отражения в кривом зеркале или изуродованные детские игрушки.

В семь часов вечера я проехал только полдороги. Усталость и голод мучили меня. Напрасно обыскал я корзинку, где утром лежали припасы, в надежде найти завалявшийся ломоть хлеба. Ничего не осталось, кроме бутылки скисшего молока.

На моих часах было уже 10, когда я подъехал к гостинице. Однако, еще не начинало темнеть. Часы в гостинице показывали 6, так что мне вторично пришлось переставить стрелки назад. Пока мне стряпали обед (третий в этот день) мистер Барнэй принес горшок молока и большой ломоть хлеба.

— Это вечернее молоко? — спросил я, с жадностью откусывая хлеб и запивая большими глотками.

— Коровы еще не вернулись; молоко утреннее.

— А мое молоко, знаете, скисло, — сказал я. — Не пришлось выпить его на обратном пути. Странно: ведь сегодня не жарко.

— Что тут странного? Ему теперь часов двадцать.

— Вы разве дали мне вчерашнее молоко?

— Нет, то молоко одного удоя с этим.

— А этому сколько времени?

— Часов двенадцать.

— Но если одного удоя, то почему мое старше?

— Постарело в дороге.

Опять загадка—одна из тех, которые преследовали меня весь день. Однако, я слишком устал, чтобы пытаться сейчас распутать всю цепь странных происшествий, и переменил разговор.

## 2. *МИСТЕР ГАРВУД ИЩЕТ РАЗГАДКУ*

На следующий день я долго ломал голову над всем тем, что произошло накануне.

Усталость и необычайный аппетит можно было приписать дороге и непривычному климату. Колоссальный расход бензина—два бака за два часа? Где-то есть течь, или мотор не в порядке. Необычайный вид дороги и людей на ней? Галлюцинация, последствие усталости. Но часы... Как объяснить их изумительный ход? Повреждение механизма? Я вынул свои часы и сверил их со стенными. Сегодня они шли правильно. Повреждение, которое излечилось само собой! Ну, а как понять удивительные разговоры с содержателями гостиниц? Считать их чудаками? Мистер Барнэй, конечно, шутил насчет молока. Я представил себе этого добродушного, положительного толстяка. В нем много смешного, но ни капли юмора...

Мне захотелось еще раз увидеть этого странного человека, чтобы переговорить на-чистую.

— Здравствуйте, мистер Барнэй,—сказал я, входя в столовую.

Он поднял голову, вскинул на лоб огромные очки в черепаховой оправе и приветствовал меня своей пухлой ручкой с короткими пальцами.

— Как чувствуете себя после вчерашнего путешествия?

— Ну, какое там путешествие! Двухчасовая прогулка...

— Двухчасовая для нас, а для вас шестичасовая. Две „прогулки" по шести часов подряд, — на это не всякий способен.

— Почему же вы считаете для себя 2 часа, а для меня 6?

— Ну, как же? Ведь вы ехали.

— У вас, я вижу, ведется двойная бухгалтерия: для домоседов и для ездящих. Это как на войне: месяц в окопах засчитывается за год службы мирного времени.

— Нет, — ответил он, даже не улыбаясь, — двойная бухгалтерия для меня слишком сложна. С меня достаточно простой записи расходов, — он указал на счета и расписки, лежавшие на столе. — Что касается окопов, то часы идут там ничуть не быстрее, чем в тылу.

Положительно, этот человек неспособен шутить!

— Кстати, о часах, — сказал я. — Вчера с моими часами произошло нечто странное: ушли вперед на 8 часов. Я два раза переставлял их. Не понимаю, в чем тут дело.

— Как же это случилось?

— Да вот, выехал я от вас в 12, приехал на место в 2; смотрю — а на часах 6. На обратном пути такая же история.

— Что же тут странного?

— Странно то, что сегодня они опять идут хорошо. Исправились сами собой.

— Но почему вы думаете, что они были испорчены?

Он сказал это самым невозмутимым тоном.

— Простите, но если часы за 2 часа уходят на 4 часа, то есть основание считать их испорченными, — сказал я.

Мистер Барнэй сдвинул свои черепаховые очки со лба на нос, затем поднял снова на лоб и окончательно опустил их на нос. Это, повидимому, означало, что толстяк взволнован. Затем, взяв чистый лист бумаги, он начертил на нем что-то и молча протянул мне.

— Вот график вашего путешествия.

Я был изумлен. Этот толстяк толкует о графиках!

— Ну, что же, — сказал я, мельком взглянув на корявый чертеж, — давайте изобразим мое путешествие графически, раз это вас интересует.

Взяв со стола лист бумаги, я стал чертить, поясняя мистеру Барнэю.

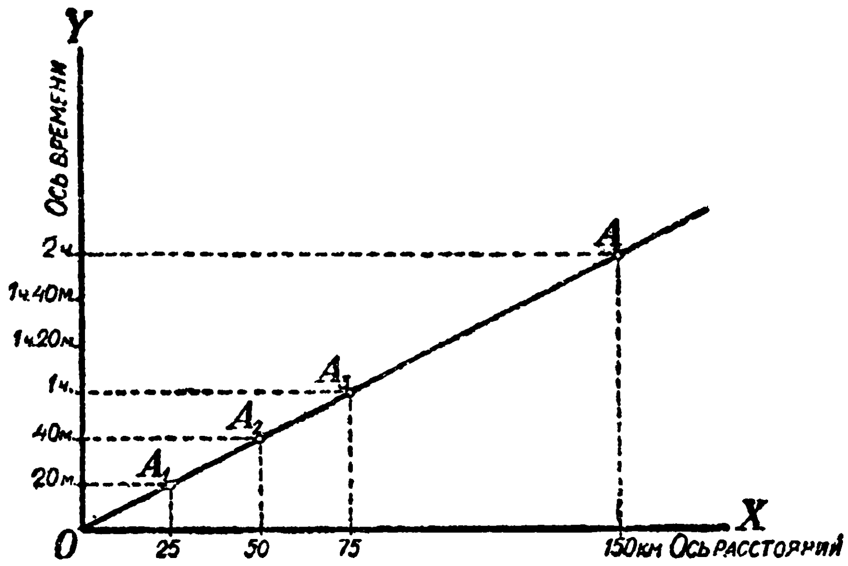



Рис. 98.

— Эти две прямые ($OX$ и $OY$ на чертеже 98) будем считать осями координат. По оси $OX$ будем определять расстояния, по оси $OY$—время. Точка $O$ изображает собою событие, которое произошло здесь в гостинице вчера в 12 часов дня. Точка $A_1$—событие, которое произошло по пути в город на расстоянии 25 км от нас через 20 минут после 12 часов дня. Понятно?

Прежде чем он собрался ответить, я продолжал:

— Точка $O$ изображает мой отъезд отсюда. Через 20 минут я был на расстоянии 25 км (точка $A_1$). Через 40 минут—на расстоянии 50 км (точка $A_2$), через час — на расстоянии 75 км (точка $A_3$) и т. д. Все точки, изображающие меня в разные моменты, лежат на прямой $AO$.

Точка $A$—мое прибытие в столицу. Прямая $OA$—график моего путешествия.

Мистер Барнэй взглянул на мой чертеж.

— $OX$ у вас ось пространства для гостиницы?

— Да, вдоль этой прямой я отсчитываю расстояния.

— $OY$—ось времени для гостиницы?

— Да, вдоль нее я отсчитываю время.

— $OA$—ось времени для путешественника?

Я задумался. Пожалуй, прямую $OA$, точки которой изображают путешественника в разные моменты, действительно можно назвать осью времени путешественника, подобно тому, как прямая $OY$, точки которой изображают гостиницу в разные моменты, названа осью времени гостиницы. Замечание мистера Барнэя не лишено некоторого смысла, тем более, что путешественник имеет право смотреть на дело так, будто он неподвижен, а гостиница и дорога убегают назад. С этой точки зрения прямая $OY$ будет графиком движения гостиницы, а $OA$—осью времени путешественника.

— Да,—сказал я,—прямую $OA$ можно считать осью времени путешественника.

— А где же его ось пространства?

— Ось пространства $OX$.

— Это для гостиницы. А я спрашиваю, где ось пространства путешественника?

— Ось пространства одна и та же,—ответил я.

Очки мистера Барнэя заходили с носа на лоб и обратно. Судя по числу передвижений, волнение толстяка было значительно.

— Это вздор,—сказал он.—Оси времени разные, а ось пространства одна? Абсурд! Ось пространства всегда должна быть перпендикулярна к оси времени.

Так начался наш спор. Никто не мог предвидеть его роковых последствий. Тогда я был только удивлен странной ошибкой Барнэя, непоследовательностью, с какой он перескочил от моих часов к графику, и той бессмыслицей, которую он городил по поводу моего путешествия. Теперь я знаю, что менее всего его можно обвинить в непоследовательности. В помешательстве Барнэя была своя логика. Нелепое представление о графиках являлось центром безумия, от которого во все стороны отходили остальные нелепости. Но в то время я не подозревал, в какой надежной цитадели укрыто сумасшествие Барнэя, и с легким сердцем ввязался в спор.

### *3. НА СЦЕНУ ВЫСТУПАЕТ АВТОР*

Прервем здесь беседу Гарвуда и Барнэя, чтобы дать читателю необходимые пояснения относительно личности наших героев и места действия. Гарвуд самый обыкновенный человек, постоянный житель нашего мира. Характер, возраст, род занятий и точный адрес его не имеют значения. Каким-то неведомым образом Гарвуд попал в необыкновенный мир (мир № 1), устроенный по иным законам, нежели наш мир. Все приключения, которые происходят здесь с Гарвудом, объясняются особенностями мира № 1.

Барнэй — содержатель гостиницы — коренной обитатель мира № 1, куда случайно попал Гарвуд.

Чтобы описать мир № 1, мы вынуждены прибегнуть к графикам. Это не совсем обычный метод описания. Но и предмет описания не обычен, и нам невозможно обойтись теми приятными методами, которыми пользуются для изображения лесных тропинок, цветистых лугов, морских пляжей и других живописных уголков природы. Изобразить целый мир можно только на сжатом и точном языке математики, так что читатель должен примириться с нашим геометрическим методом.

Графики Гарвуда — это самые обыкновенные графики, которые чертят в школе. К тому, что вы знаете о графиках, полезно добавить следующее.

Вовсе необязательно, чтобы оси координат были взаимно перпендикулярны: ничто по существу не изменится, если выбрать координатные оси наклоненными под произвольным углом.

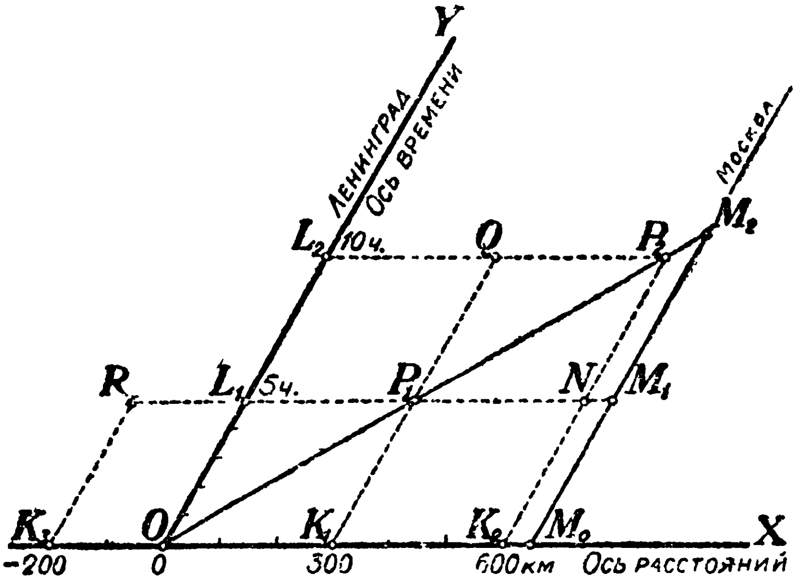



Рис. 99.

Так, на черт. 99 изображено несколько событий, которые происходят на пути между Ленинградом и Москвой. $OX$—ось пространства, наклонная к ней прямая $OУ$ — ось времени. Точка $N$ изображает событие, которое произошло на дороге Ленинград — Москва в 5 часов утра на расстоянии 600 км от Ленинграда. Событие, которое произошло в тот же момент времени (5 час. утра) на расстоянии 300 км от Ленинграда, изображено точкой $P_1$. Вообще, чтобы найти место и время события, изображенного некоторой точкой, нужно провести через эту точку прямые, параллельные координатным осям; отрезок, который одна из этих прямых отсекает на оси времени ($OУ$), измеряет в принятом для этой оси масштабе промежуток времени между данным событием и событием $O$, а отрезок на оси расстояний ($OX$) — расстояние данного события от события $O$. Читатель без труда определит, когда и где случились события $P_2$, $Q$, $K_1$, $L_1$, изображенные на чертеже. Событие $R$, например, произошло в 5 часов утра на расстоянии — 200 км (минус 200 км) от Ленинграда Знак „минус" указывает направление, обратное направлению на Москву (см. черт. 100).

События $L_1$, $P_1$, $N$, происходят одновременно, именно в 5 часов утра. Вообще события, изображенные точками прямой, параллельной оси $OX$, одновременны. Точки самой оси $OX$ изображают события, которые происходят в полночь. События, совершающиеся в одном и том же месте, изображаются точками прямой, параллельной оси $OY$. Точки самой оси $OY$ (оси времени) изображают события, происходящие в Ленинграде, иначе говоря, они изображают Ленинград в разные моменты.

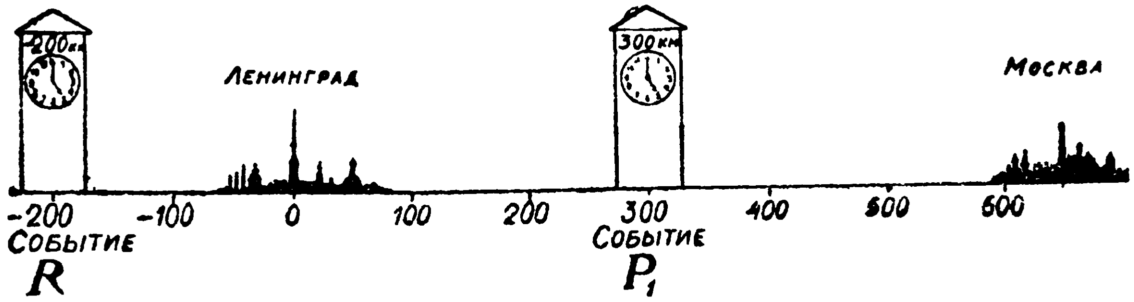



Рис. 100.

По нашему чертежу легко определить расстояние между двумя событиями или промежуток времени, отделяющий одно событие от другого. Например, событие $N$ произошло на расстоянии 300 км от $P_1$ (это расстояние измеряется отрезком $K_1K_2$, который равен отрезку $P_1N$). Тем же отрезком $K_1K_2$ измеряется расстояние между событиями $P_1$ и $P_2$, а также между $Q$ и $N$.

Представим себе, что ровно в полночь из Ленинграда отправляется в Москву поезд, идущий со скоростью 60 км в час. Отправление из Ленинграда совпадает с событием $O$. В 5 часов утра поезд проходит мимо сторожки, расположенной на расстоянии 300 км от Ленинграда; это событие совпадает с событием $P_1$. В 10 часов утра поезд находится на расстоянии 600 км от Ленинграда. Событие, которое происходит в этот момент в поезде, совпадает с событием $P_2$. $M_2$ — прибытие поезда в Москву. Предложим читателю изобразить события, которые происходят в поезде в 1 час пополуночи, в 2 часа, в 3 часа и т. д. Легко убедиться, что все точки, изображающие эти события, т. е. изображающие поезд в разные моменты, расположены на одной прямой, именно на прямой $OM_2$. Эта прямая представляет собой график движения поезда (см. черт. 101).

Итак, график движения поезда есть совокупность точек, изображающих поезд в разные моменты.

Допустим, что чертеж 101 вывешен в поезде; пассажиров интересует расстояние любого события не от Ленинграда, а от поезда, в котором они находятся. Как же воспользоваться нашим графиком для ответа на этот вопрос? Очень просто. Чтобы узнать, на каком расстоянии от поезда произошло, например, событие $A$, достаточно провести через точку $A$ прямую, параллельную $OM$. Отрезок $OC$, который эта прямая отсекает на оси расстояний, измеряет в принятом масштабе расстояние события $A$ от поезда. В самом деле, в момент, когда происходит событие $A$, поезд изображается точкой $B$, т. е. находится от события

$A$ на расстоянии, которое измеряется отрезком $BA$. Но $BA = OC$ Стало быть событие $A$ произошло на расстоянии 300 км от поезд (в сторону Москвы). Таким же образом найдем, что событие $D$ произошло на расстоянии 500 км от поезда (в сторону Москвы), событие $E$ на расстоянии минус 300 км от поезда (300 км в сторону Ленинграда) и т. д. Словом, чтобы определять расстояния разных событий

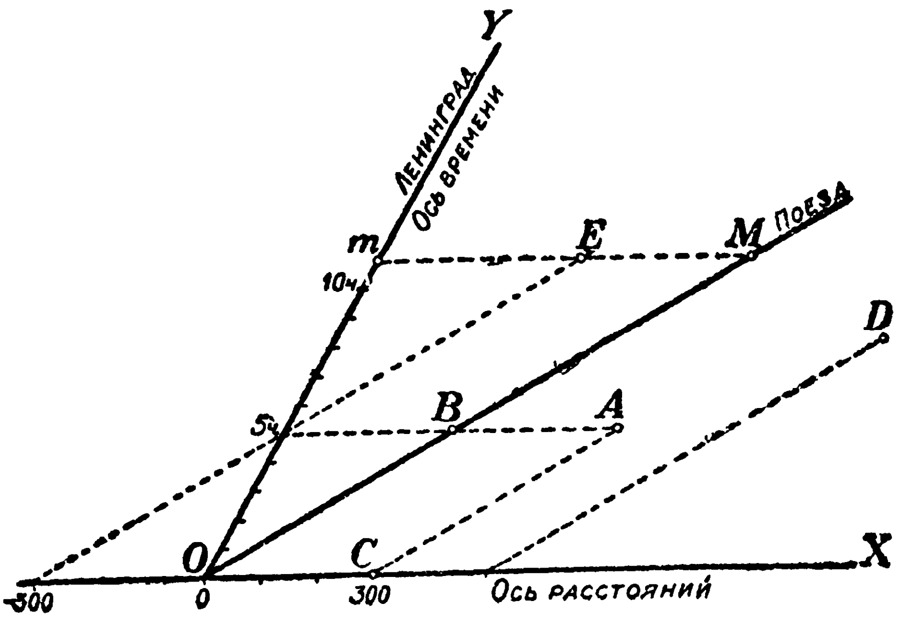



Рис. 101.

от поезда, нужно поступать так, как если бы **график движения поезда был осью времени.**

Итак, если мы хотим определять расстояния разных событий от Ленинграда, мы должны выбрать осью времени прямую $OY$, точки которой изображают собой Ленинград в разные моменты. Если же мы хотим определять расстояния событий от поезда, мы должны осью времени считать прямую $OM$, точки которой изображают поезд в разные моменты.

Пассажир, сидящий в поезде, склонен, конечно, относить все расстояния к поезду. Поэтому он будет считать осью времени прямую $OM$. Наблюдатель, остающийся в Ленинграде, наоборот, выберет в качестве оси времени прямую $OY$. Соответственно этому ленинградец будет считать, что, например, события $L_1$ и $L_2$ (которые происходят в Ленинграде) совершаются в одном и том же месте, а $P_1$ и $P_2$ (которые происходят в поезде) совершаются в разных местах (черт. 102). Иначе говоря, ленинградец считает Ленинград неподвижным, а поезд движущимся, тогда как пассажир, наоборот, принимает, что поезд неподвижен ($P_1$ и $P_2$ происходят в одном месте), а Ленинград движется назад ($L_1$ и $L_2$ происходят в разных местах). Вы уже знаете, что обе точки зрения (пассажира и ленинградца) равноправны.

Осью пространства для обоих наблюдателей остается прямая $OX$, так как и ленинградец и пассажир согласны в том, что, например, события $K_1$ и $K_2$ произошли одновременно, именно в полночь. Чтобы между пассажиром, который считает поезд неподвижным, и наблюдателем, который считает неподвижным Ленинград, было полное согласие в оценке времени (ведь наш мир таков, что никаких разногласий на этот счет не возникает, не правда ли?), необходимо еще надлежащим

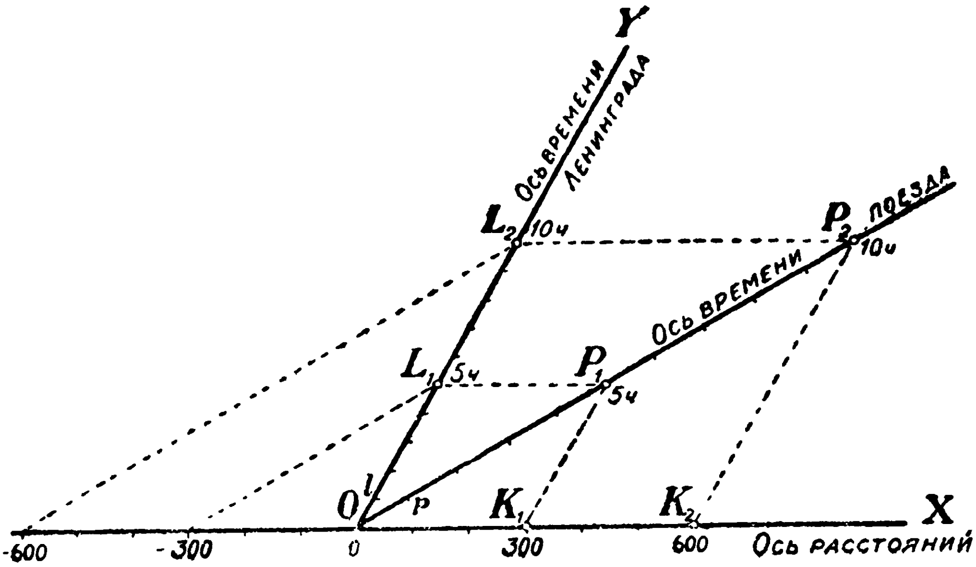



Рис. 102.

образом выбрать масштабы на осях времени. Именно, следует считать, что отрезок *Op* на оси пассажира изображает такой же промежуток времени, какой изображает меньший отрезок *Ol* на оси ленинградца.

Словом, наш мир, согласно обычным представлениям, устроен таким образом, что графическое описание событий с точки зрения двух движущихся друг относительно друга наблюдателей (мы говорим о равномерном прямолинейном движении) должно производиться согласно изложенным правилам: разным наблюдателям соответствуют разные оси времени и разные масштабы для времени, а ось пространства остается одна и та же.

Иначе устроен воображаемый мир № 1. Чтобы изображать здесь события с точки зрения двух наблюдателей, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, нужно поступать по иным правилам.

Во-первых, координатные оси здесь должны быть непременно взаимно перпендикулярны. Пока речь идет о графике движения поезда с точки зрения одного наблюдателя, скажем, находящегося на станции, это требование не вносит ничего нового: получается обычный график, такой, какой чертят в школе (черт. 103). Точки прямой $OM_2$ изображают поезд в различные моменты. Точки прямой $OY$ (ося времени) — это станция отправления, точки прямой $M_0 M_2$ — станции назначения. Точка $P_1$ изображает событие, происходящее на расстоянии 300 км от города Λ в 5 часов утра, $M_2$—прибытие поезда в город М.

Станем теперь на точку зрения пассажира, едущего в поезде. Он в праве считать поезд неподвижным, а полотно дороги убегающим навстречу поезду. Такой точке зрения соответствует выбор прямой $OM_2$ в качестве оси времени. В этом тоже еще нет ничего нового. Но ось пространства пассажира должна быть непременно **перпендикулярна к его оси времени**. В этом заключается первое существенное отличие мира № 1 от нашего мира. Кроме того, масштабы на разных осях времени в мире № 1 должны быть **одинаковы**, и точно также должны быть одинаковы масштабы на разных осях пространства.

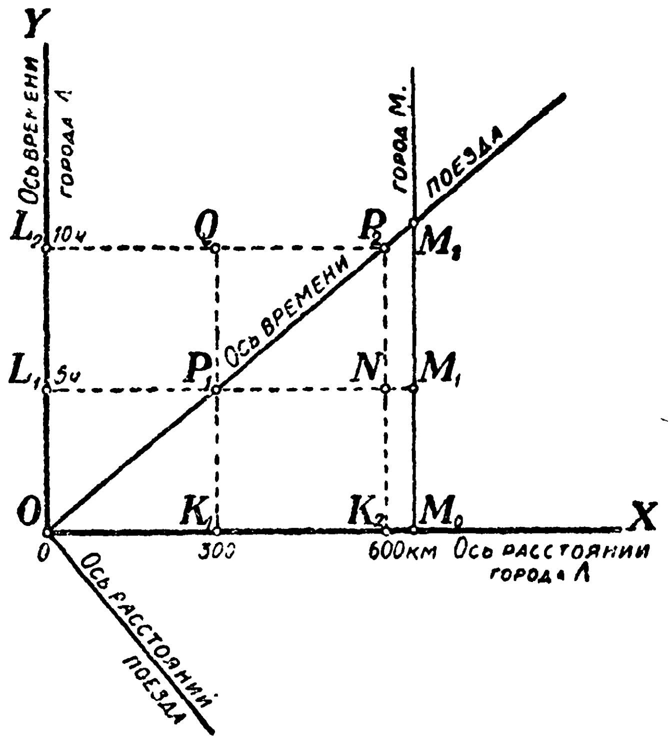



Рис. 103.

Чтобы установить масштабы на разных осях, нужно провести вокруг общего начала координат, как около центра, окружность. Эта окружность отсекает на координатных осях равные отрезки, которые на всех осях времени изображают один и тот же промежуток времени, а на всех осях пространства — одно и то же расстояние (черт. 104).

Почему в мире № 1 нужно применять именно такое правило замены координат при переходе от точки зрения одного наблюдателя к точке зрения другого наблюдателя? Потому что мир № 1 устроен так, что только при соблюдении этого правила мы получим согласное с фактами описание того, как в этом мире воспринимают события наблюдатели, движущиеся друг относительно друга. Пусть в момент отправления поезда пассажир и наблюдатель, остающийся на станции, ставят свои часы на 12. Спустя некоторое время наблюдатель на станции видит вдали вспышку пламени и слышит грохот взрыва. Он смотрит на свои часы и отмечает, что взрыв (событие $A$ на черт. 105) произошел, скажем, в 4 часа дня. Тот же взрыв слышит и пассажир, смотрит на часы и устанавливает, что взрыв случился в 6 часов дня. Точно также по-разному оценивают они расстояние до того места, где произошел взрыв. Чем вызвано это разногласие? Конструкцией мира № 1. Этот мир устроен так, что подобные разногласия в нем неизбежны. Правило графического изображения событий, которое мы выше установили, находится в полном согласии с указанной особенностью этого мира.

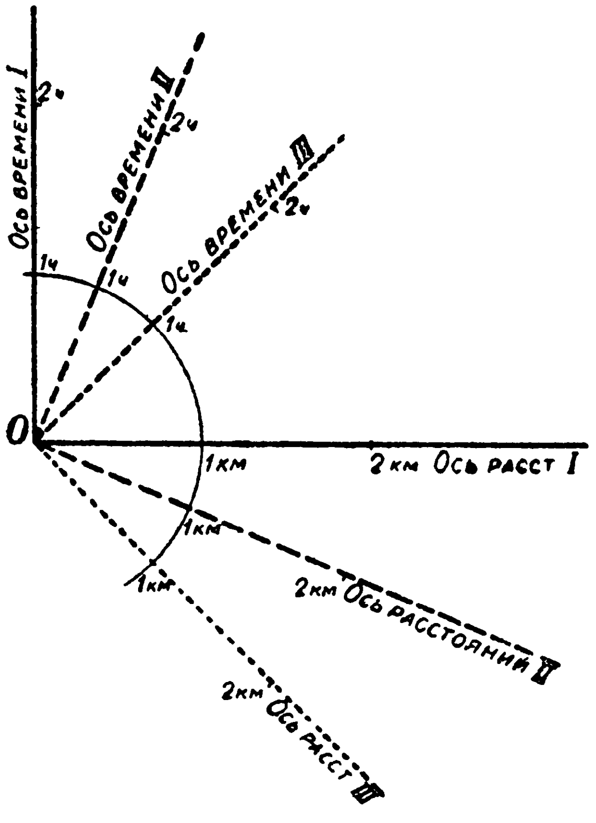



Рис. 104.

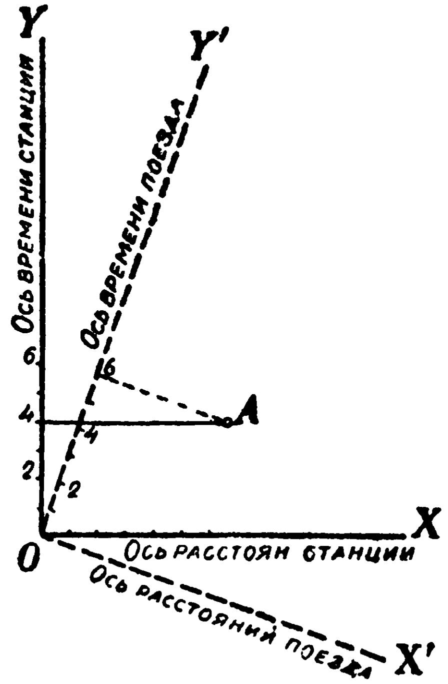



Рис. 105.

Странное несогласие в оценке места и времени одного и того же события разными наблюдателями представляется Гарвуду совершенно нелепым, но, забегая немного вперед, скажем, что подобное несогласие существует, как установил Эйнштейн, и в нашем действительном мире. Весьма интересно поэтому познакомиться с тем, как воспринимают это, казалось бы, нелепое разногласие коренные обитатели мира № 1, вроде Барнэя. Хотя мир № 1 устроен иначе, чем наш мир, тем не менее между ними, согласно Эйнштейну, есть так много общего, что, усвоив образ мышления жителей мира № 1, мы затем без труда сумеем ориентироваться в несколько более сложном мире Эйнштейна.

Вернемся теперь к нашему прерванному повествованию.

## 4. ЛЕЧЕНИЕ МАТЕМАТИКОЙ

Мистер Барнэй так заинтересовал меня, что оттеснил на задний план вчерашние странные происшествия.

„Кто бы мог предположить,— думал я, — что этот спокойный человек помешался на графиках! Пожалуй, если доказать ему вздорность его идеи, он излечится. Но как переубедить несчастного?“

Я стал обдумывать следствия, вытекающие из его графика, и скоро наткнулся на ряд вопиющих нелепостей.

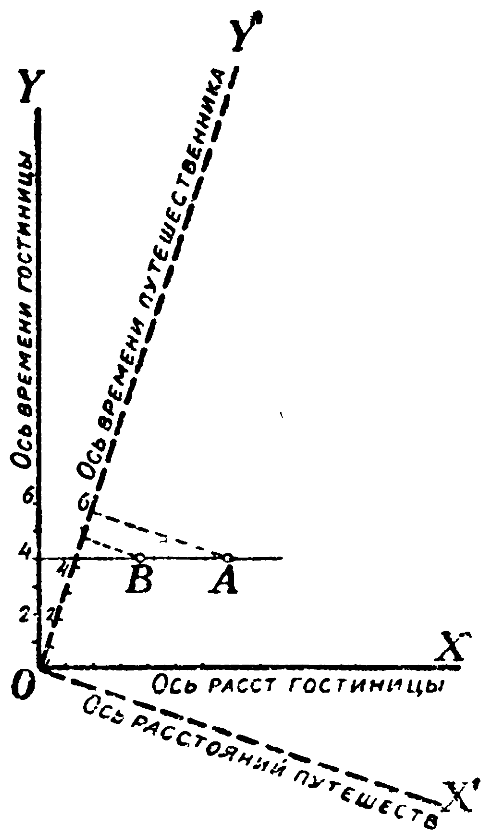


Рис. 106.

Первая нелепость. Событие $A$, с точки зрения наблюдателя, сидящего в гостинице, случилось в 4 часа дня, а с точки зрения путешественника в 6 часов дня (черт. 106): одно и то же событие происходит с точки зрения разных наблюдателей в разное время.

Вторая нелепость. Два события $A$ и $B$, одновременные для наблюдателя в гостинице (оба происходят в 4 ч. дня), не одновременны для путшественника: для него событие $A$ случилось в 6 часов дня, а $B$ в 5 часов.

Третья нелепость. Наблюдатель и путешественник по-разному оценивают один и тот же промежуток времени. Например, между событиями $O$ и $A$ прошло с точки зрения наблюдателя 4 часа, а с точки зрения путешественника — 6 часов.

Четвертая нелепость. Наблюдатель и путешественник по-разному оценивают одно и то же расстояние. Например, пусть точки прямой $EE$ (черт. 107) изображают город в разные моменты. Тогда расстояние от гостиницы до города с точки зрения нашего наблюдателя измеряется отрезком $OD$, т. е. равно 150 км, а с точки зрения путешественника отрезком $OD'$, т. е. равно 200 км.

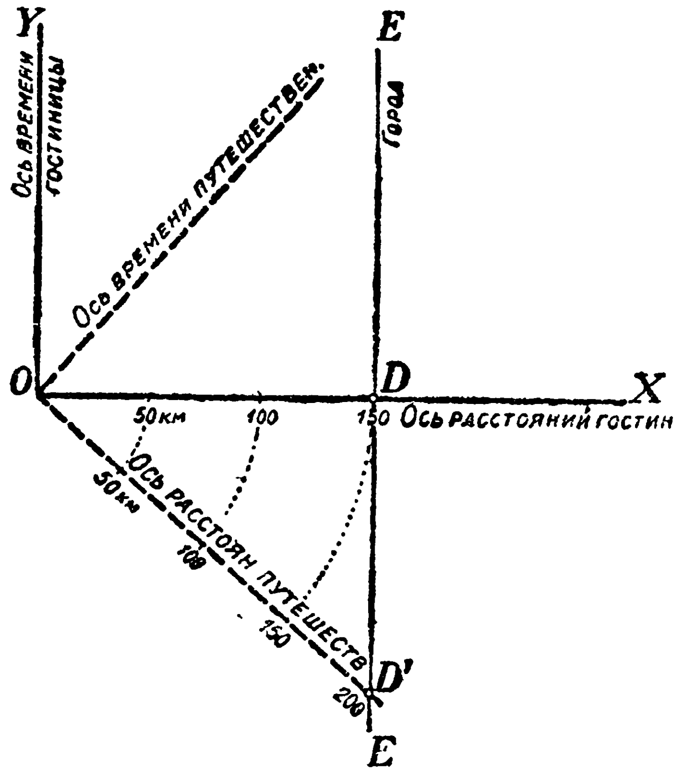



Рис. 107.

С этой последней нелепости я и решил начать лечение моего бедного хозяина. Мистер Барней сидел у себя в кабинете.

— Сколько километров до города? — спросил я, подойдя к нему с невинным видом.

— Сто пятьдесят.

— Вот видите, а с точки зрения путешественника, если он будет придерживаться вашего метода, получится больше, например, 200.

Я с торжествующим видом протянул свой чертеж.

— Да, — невозмутимо ответил мистер Барнэй, даже не взглянув на него, — с точки зрения путешественника 200.

— Но ведь вы сами сказали, что до города 150 км; что же ввело в заблуждение путешественника? Не ваш ли метод?

— О каком заблуждении вы говорите? С нашей точки зрения от моей гостиницы до города 150 км, а с точки зрения путешественника — 200.

— Чем же вы объясните разногласие между нами и путешественником?

— Не вижу никакого разногласия.

— Помилуйте: один говорит 150 км, другой — 200! А, вы спрашиваете, какое разногласие...

— Да нет же! Один говорит: „с моей точки зрения 150 км“, а другой — „с моей точки зрения 200“ Какое же тут разногласие?

— Но расстояние-то одно?

— Нет, разные.

— Разные?!.. Дорога одна?

— Дорога одна, но точки зрения разные; поэтому и расстояния разные. Длина дороги с точки зрения одного наблюдателя 150 км, с точки зрения другого — 200.

— Одна и та же длина может быть, в зависимости от точки зрения, разной?

— Не одна и та же длина, а одна и та же дорога. С разных точек зрения она, конечно, имеет разную длину.

— Не понимаю, — сказал я, беспомощно разводя руками.

Мистер Барнэй с тоской поглядел на меня и вздохнул.

— Под каким углом вы видите ту колокольню? — спросил он.

— Градусов 10.

— Тот прохожий видит ее под большим углом, градусов в 20, — продолжал мистер Барнэй. — Вам не кажется, что между вами имеется разногласие?

— Нет, какое же разногласие? Мы смотрим на колокольню с разных точек зрения.

— С разных точек зрения одна и та же колокольня видна под разными углами,—подхватил Барнэй.—Так и дорога: с разных точек зрения одна и та же дорога представляется разной длины.

— Какова же ее истинная длина?

— А каков истинный угол, под которым видна колокольня?

— Нелепый вопрос! Истинного угла, под каким видна колокольня, не существует, это—абсурд. Есть только угол, под каким она видна из одной точки, из другой, из третьей.

— Прекрасно, — сказал Барнэй. — То же самое относится и к дороге. Истинной длины дороги не существует, это—абсурд. Существует только длина, под которой дорога представляется с одной точки зрения, с другой, с третьей и т. д.

— Что значит „длина, под которой представляется дорога с данной точки зрения“?

— Мы обычно говорим короче: „длина дороги с данной точки зрения“. Но это плохое выражение, потому что дорога длины не имеет, как колокольня не имеет угла. Существует только угол, под которым колокольня видна из разных точек. Точно также существует только длина, под которой представляется дорога с разных движущихся относительно ее систем. Угол, под которым вы видите колокольню, зависит от того, как далеко вы от нее находитесь. Длина, под которой представляется дорога зависит от того, как скоро вы относительно нее передвигаетесь.

— Значит, по-вашему, дорога не имеет длины?

— Разумеется, нет.

— Ваш стол не имеет длины?

— Не имеет. Вам и мне он виден под длиной в два метра, а тому прохожему—под большей длиной.

— Вы считаете в порядке вещей, что с точки зрения путешественника расстояние отсюда до города больше, чем с точки зрения неподвижного наблюдателя?

— Разумеется.

— Если я на автомобиле поеду мимо вашего дома, то дом представится мне длиннее, чем сейчас?

— Да.

— Чем же вызывается такой обман зрения?

— Никакого обмана зрения здесь нет.

— Вы хотите сказать, что дом действительно станет длиннее? Какая же сила его растянет?

— Ничего с домом не сделается. Изменится только длина, под какой он виден.

— Вы говорите: длина дома изменится, а с домом ничего не станется. Как же так?

— *Не длина дома, а длина, под которой виден дом.* Угол, под которым видна колокольня, увеличится, когда вы подойдете к ней ближе, хотя с колокольней при этом ничего не сделается. Так и с домом. С ним ничего, конечно, не случится оттого, что вы проедете мимо него, но *длина*, под которой он вам представляется, изменится. Ведь эта длина зависит не только от дома, но и от скорости наблюдателя относительно него.

Я почувствовал, что почва под моими ногами колеблется. Здравый смысл во мне протестовал против безумной логики этого сумасшедшего, но я не находил доводов, которые можно было бы противопоставить ей. Самое сильное оружие было выбито из моих рук. Однако, я не сдавался и пустил в ход другие нелепости.

— А промежутки времени существуют, или они тоже только самообман?—робко спросил я.

— Конечно, существуют, как и длина и углы. Разве угол, под которым видна колокольня, самообман? А длина, под которой представляется дорога, самообман? Все это существует в действительности, все это можно измерить.

— Взгляните. Промежуток времени между событиями *О* и *А* с точки зрения наблюдателя, сидящего в гостинице, равен четырем часам, а с точки зрения путешественника—шести. Разве это не нелепо? Один и тот же промежуток времени оценивается по-разному, и неизвестно, кто прав.

— Вы повторяете прежнюю ошибку, — возразил мистер Барнэй.—Тут не один промежуток времени, а два.

— Почему два? Вот, например, *О* изображает отъезд путешественника, а *А*,—скажем,—крушение его автомобиля. Тогда промежуток времени между *О* и *А* есть длительность путешествия от отъезда до крушения. Ведь тут о д н а длительность.

— Нет, две. Продолжительность путешествия с точки зрения вашего наблюдателя — это одна. Продолжительность путешествия с точки зрения путешественника—это другая. Так же, как с углами, под которыми видна колокольня; угол, под которым она видна отсюда, и угол, под которым она видна из другого места, — два разных угла, а не один.

— Значит, нельзя узнать, сколько продолжалось путешествие на самом деле?

— Этот вопрос не имеет смысла. Наблюдатель пережил путешествие под промежутком времени в 4 часа, а путешественник пережил его под промежутком времени в 6 часов. Это и было на самом деле.

— Стало быть, не существует длительности самой по себе? Можно говорить только о длительности, под которой пережиты два события—начало и конец процесса—из автомобиля, из поезда, из гостиницы и т. д.?

— Да.

Я больше не спорил и только задавал вопросы, потому что безумие Барнэя начало овладевать и мною. Впрочем, тогда я еще не сознавал этого.

— А может ли случиться, что два события, которые один наблюдатель воспринимает под промежутком времени, скажем, в 1 час, другой воспринимает под нулевым промежутком времени?

— Да, если наблюдатели движутся друг относительно друга. То, что одновременно для одного, не одновременно для другого.

— Странно, более чем странно!—проговорил я в раздумьи.

— Вы как будто начинаете приходить в себя, — сказал мистер Барнэй.—Повидимому, вы были жертвой обыденной речи. Мы говорим: „пять метров сукна", „урок длился 2 часа" и т. д. Это, конечно, может сбить с толку.

— А как надо говорить, по-вашему?

— Надо так: „кусок сукна, который представляется наблюдателю, неподвижному относительно него, под длиною в 5 метров". „Урок, который представляется наблюдателю, неподвижному относительно класса, под промежутком времени в 2 часа".

— Пространно и неудобно,—заметил я.

— Да, потому в обыденной речи и выражаются короче. Но не нужно забывать, что при этом, в буквальном смысле слова, ради краткости смысл опускается.—Мистер Барней улыбнулся.

Я ушел к себе потрясенный.

## 5. „ВРАЧУ, ИСЦЕЛИСЯ САМ"

Я не ложился и, сидя за столом, продолжал искать новые нелепости для борьбы с безумием мистера Барнэя. Я находил их не мало, но все они исчезали, как только я вспоминал слова Барнэя: „Вещи не имеют длины;

существуют только длины, под которыми вещь представляется с разных движущихся друг относительно друга систем. Явления не имеют длительности; существуют только длительности, под которыми представляется явление из разных движущихся друг относительно друга систем“. Наконец, я набрел на одну нелепость, которая показалась мне очевиднее других.

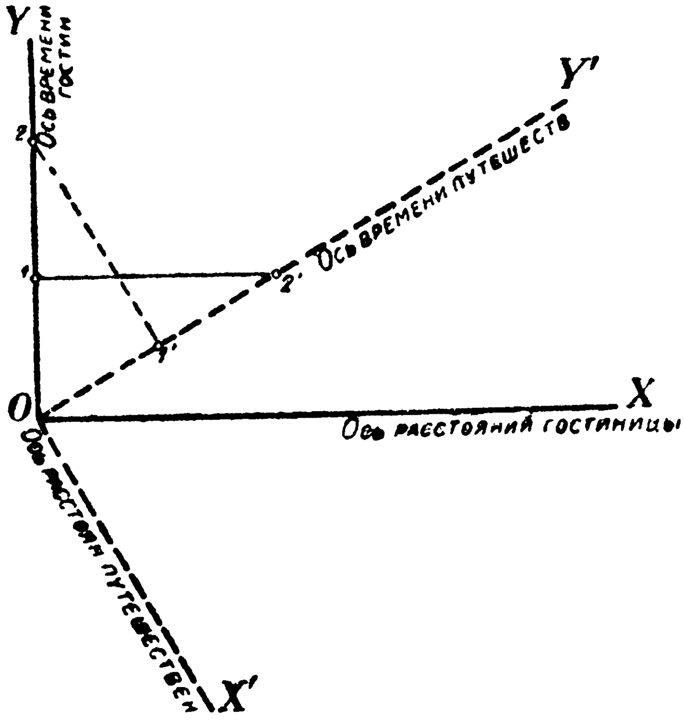



Рис. 108.

Когда часы путешественника показывают 2 часа (точка 2' на черт. 108), часы в гостинице показывают 1 час (точка 1). Это — с точки зрения человека, сидящего в гостинице. А с точки зрения путешественника получается вот что: когда его часы показывают 1 час (точка 1'), часы в гостинице показывают 2 часа (точка 2). Часы путешественника уходят сравнительно с часами в гостинице, а часы в гостинице уходят (тоже уходят!) сравнительно с часами путешественника.

Подобная же нелепость получилась и с длиной. Метровая линейка, уложенная вдоль автомобиля, с точки зрения наблюдателя в гостинице имеет в длину больше метра, а с точки зрения путешественника такая же линейка, уложенная вдоль дороги, тоже имеет в длину больше метра (черт. 109). Иван больше Петра, а Петр больше Ивана... Абсурд! Я тотчас побежал к Барнэю.

Мистер Барнэй укладывался спать. Наскоро извинившись за позднее посещение, я с торжествующим видом преподнес ему свое открытие.

Он внимательно поглядел на меня сквозь очки.

— У вас усталый вид, мистер Гарвуд,—сказал он,— вам надо отдохнуть и полечиться.

— Мистер Барнэй, оставьте в покое мое здоровье. Признайтесь, такой ерунды вы не ожидали...

— Почему вы считаете это ерундой?

— Разве не видите? Час путешественника больше, чем час в гостинице, а час в гостинице больше, чем час путешественника. *А* больше *В*, а *В* больше *А*.

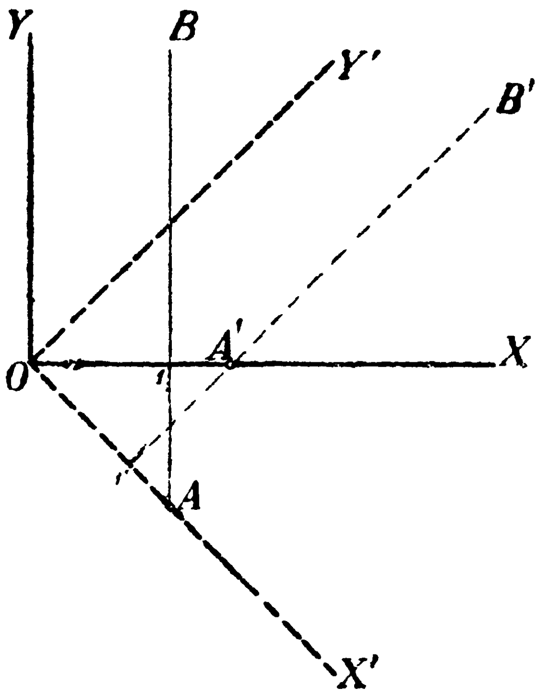



Рис. 109.

— Что вы называете часом путешественника?

— Ну, хотя бы время полного оборота минутной стрелки на его часах.

— Что значит „время полного оборота“? С какой точки зрения оценивается это время?

— Без всякой точки зрения...

— Тогда это бессмысленный набор слов. Оборот стрелки не имеет длительности сам по себе...

— Ну, уж если вам так необходима „точка зрения“,— выпалил я,—будем считать, что время оборота стрелки оценивается с точки зрения человека, не страдающего ожирением мозга...

Я тотчас пожалел о своей грубости; но мистер Барнэй не понял намека.

— Дело не в его мозге,—невозмутимо ответил он,—а в том, движется ли наблюдатель относительно часов, или нет.

— Не все ли равно? Дело не в нем, а в часах.

— Дело не только в часах, но и в том, с какою скоростью наблюдатель движется относительно часов. Разные наблюдатели воспринимают оборот стрелки под разными промежутками времени, если они движутся относительно часов с разными скоростями. Под наименьшим промежутком времени переживает это явление наблюдатель, неподвижный относительно часов. Поэтому, с точки зрения каждого наблюдателя, все часы уходят, кроме его собственных.

— Как ни изворачивайтесь, никогда я не поверю, будто возможно, что $A$ больше $B$, а $B$ больше $A$,—с раздражением сказал я.

— Да нет же! В вашем примере не две величины, а четыре. Час путешественника с точки зрения путешественника — это $A$. Час наблюдателя с точки зрения путешественника—это $B$. Как мы уже говорили, $A$ меньше $B$. Затем час наблюдателя с точки зрения наблюдателя, это $C$. И час путешественника с точки зрения наблюдателя — это $D$. Как мы знаем, $C < D$. При этом $A = C$ и $B = D$. Что же вас смущает?

Когда я вышел из комнаты мистера Барнэя, за мною щелкнула задвижка. Я понял, что мистер Барнэй сегодня больше не желает заниматься графиками.

## *6. ПОСЛЕДНЯЯ СТАВКА*

Под утро новая мысль осенила меня, и вместе с нею родилась надежда. Опыт!.. Как я мог забыть о нем,— единственном надежном учителе... Сколько раз выводил он человеческую мысль из тупиков, куда она забиралась, бродя во тьме. Он не даст обмануть себя хитрыми софизмами. Нет, мистер Барнэй, мы еще поборемся!

Как только во дворе послышался голос мистера Барнэя, я бегом устремился к нему.

— Я не сдаюсь, мистер Барнэй!—закричал я.—Пусть опыт решит наш спор.

— Какой опыт?

— Самый простой: поедем! Посмотрим, сделаются ли дома длинней с нашей точки зрения, изменятся ли промежутки времени, под которыми мы видим явления...

Мистер Барней попятился.

— А ваше путешествие в город?—спросил он.—Вы забыли?

Мое путешествие в город! Оно выскочило у меня из головы. Предо мною вдруг встала растянутая дорога, странный ход часов, ужасные фигуры прохожих, которых я встречал, гибкие колеса, скисшее молоко... Прежде чем я успел понять это, я почувствовал, что последняя моя ставка бита.

Да, я видел дорогу и прохожих под другой длиной чем сейчас, я пережил путешествие под промежутком времени в шесть часов вместо двух. Отсюда мой удивительный аппетит, отсюда чрезмерный расход бензина поэтому постарело мое молоко, поэтому так уродливы были прохожие. Факты—тоже против меня...

## *7. БЕЗ МИСТЕРА ГАРВУДА*

Мы оставляем мистера Гарвуда в самый критический момент его жизни. Оставляем навсегда. Нехорошо покидать друга в опасности. Еще хуже, если автор оставляет своего героя в беде. Но я пишу не рассказ приключений, а популярную статью о теории относительности. Мистер Гарвуд и мистер Барнэй придуманы для того, чтобы ознакомить вас с основными идеями Эйнштейна: вещи не имеют длины, явления не имеют длительности; одну и ту же вещь мы воспринимаем то под одной длиной, то под другой, в зависимости от того, с какою скоростью движемся мы относительно нее. Это не иллюзия, не кажущееся изменение; длина действительно изменяется, хотя вещь остается неизменной. То же относится к длительности, под которой мы переживаем явления.

В мире № 1, куда на свою беду попал мистер Гарвуд, эти свойства выступают с полной отчетливостью. Коренные обитатели этого мира — например, мистер Барнэй, — прекрасно ориентируются в нем. Их представления сложились под влиянием их опыта и, разумеется, находятся в добром согласии с фактами. Иной мир был бы для них совершенно непонятен. Им показалось бы нелепым, что два события, одновременные с точки зрения одного путешественника, почему-то одновременны и для всех; что линейка каким-то образом видна всем путешественникам, как бы они ни двигались относительно нее, всегда под одной и той же длиной.

Некоторые философы утверждают, будто длина и длительность по Эйнштейну зависят от сознания наблюдателя. Это не верно. Разные наблюдатели оценивают длину одного и того же предмета и длительность одного и того же явления по-разному, но их оценка зависит не от состояния их сознания, а от относительной скорости их движения. Сознание наблюдателей здесь не при чем. Угол, под которым видна колокольня, зависит не от наблюдателя, который этот угол измеряет, а от его движения относительно колокольни (и, разумеется, от высоты самой колокольни). Точно также длина линейки зависит не только от линейки, — как принято было думать до Эйнштейна, — и не от наблюдателя, который ее измеряет, — как утверждают некоторые философы, извращая Эйнштейна, — а от скорости движения наблюдателя относительно линейки.

В конечном итоге Эйнштейн утверждает, что в действительности происходят изменения, подобные тем, которые смутили Гарвуда во время его воображаемого путешествия. Мы не замечаем их в обыденной жизни, потому что они крайне малы. Но вообразите на минуту, что все обстоит, как описано в мире № 1. Можно ли приписать особенности этого мира состоянию сознания наблюдателей? Конечно, нет. Для всякого путешественника, независимо от его сознания, расстояние от гостиницы Барнэя до города будет ровно 200 *км*, если он проедет это расстояние с тою же скоростью, с какой ехал Гарвуд; оно будет иным, если путешественник поедет с другой скоростью,—но оно совершенно не зависит от сознания путешественника. То же относится и к длительности какого-либо явления.

Что дало повод Эйнштейну утверждать зависимость длины и длительности от скорости системы, из которой они наблюдаются, относительно системы, в которой они происходят, — об этом речь впереди. Пока же читатель должен конкретно представить себе, что именно утверждает Эйнштейн. Основные идеи его раскрыты выше, при описании мира № 1. Впрочем, мир № 1 кое в чем существенно отличается от нашего мира, каким его рисует Эйнштейн.

Освоиться с особенностями мира № 1 и научиться мыслить понятиями его обитателей не трудно. Но есть здесь одно обстоятельство, с которым совершенно невозможно примириться. Чтобы изобразить наглядно это затруднение, пошлем туда нашего корреспондента. На этот раз его обязанности я беру на себя. Читайте мое письмо.

### *8. КРУШЕНИЕ МИРА № 1*

Мы ехали во всю прыть наших неказистых кляч. Прямая и ровная дорога шла густым лесом. Местность считалась „нечистой“: говорили, что здесь пошаливают. Кучер то-и-дело боязливо оглядывался и не переставал погонять лошадей, которые, впрочем, при каждом ударе только вскидывали головами, но не прибавляли шага. Со мной ехал мистер Барнэй. Он сидел ни облучке, повернувшись ко мне, спиной к лошадям, и что-то рассказывал. Вдруг он вскрикнул, схватился за грудь иопрокинулся назад. (Это событие награфикеизображено точкой *A*.)

— Что с ним? — воскликнул я.

— Убит. Пуля попала в сердце, — ответил кучер.

— Кто же стрелял?

— Вероятно, это негодяй Клио с о б и р а е т с я в ы с т р е л и т ь. — (Выстрел Клио изображен точкой *B*).

— Вы говорите „собирается“; но ведь мистер Барнэй уже убит!

— Да, убит. Я и говорю, что убийцей будет Клио. Поглядите, вон он скачет за нами (точка *C*). Держу пари, что он нас догонит через 10 минут (это будущее событие изображено точкой *O*).

Град ударов посыпался на коренника; но несчастная кляча предпочитала работать головой, чем ногами, так что наша скорость не изменилась. Я оглянулся. Вдали по дороге, нагоняя нас, быстро несся всадник. На всем скаку он поднял ружье и начал прицеливаться (точка *D*). Я невольно пригнулся и намеревался соскользнуть на дно повозки.

— Не бойтесь, он целится в Барнэя, — сказал кучер, ткнув кнутом в сторону трупа, лежащего у моих ног.

— Зачем же в него стрелять, раз он уже мертв? — спросил я.

— Чудак вы! Ведь Клио нас догоняет, значит — мистер Барнэй для него еще жив. (Смерть Барнэя с точки зрения Клио одновременна с событием *A*, которому предшествует событие *D*).

— В таком случае надо его укрыть, — воскликнул я, хватаясь за труп и стараясь стащить его вниз.

— Чего же его прятать, когда он мертв? — возразил кучер.

Опасность вышибла из моей головы все представления и понятия, относящиеся к новому миру, которые, как мне казалось, я твердо усвоил. Мне стало конфузно за глупости, которые я говорил. Вдруг блестящая мысль осенила меня.

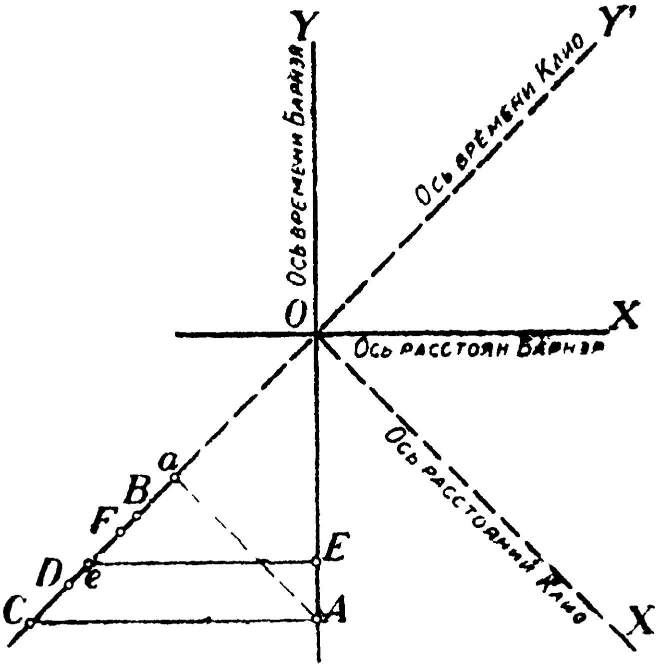


Рис. 110.

— Погодите же, — закричал я. — Я сейчас подстрелю этого негодяя.

Сказано — сделано. Бац! (точка $E$ на графике). Клио свалился мертвый (точка $F$).

— Он не успел выстрелить, — радостно воскликнул я. — Выстрел, который должен был убить мистера Барнэя, никогда не будет произведен.

— Разумеется, — согласился кучер. — После смерти не выстрелишь.

— Значит, мистер Барнэй спасен!

— Где там спасен, когда у него в сердце пуля сидит. Нет, его не воскресишь. Он уже похолодел.

— Какая пуля? Ведь Клио не выстрелил и никогда не выстрелит. Не может же в вашем сумасшедшем мире пуля, которая никогда не вылетит из ружья, находиться в сердце мистера Барнэя.

— Ну, уж... не могу вам объяснить... — ответил кучер. В голосе его была растерянность. — А только вы напрасно насчет нашего мира выражаться изволите. Сами нас выдумали, запутались, да нас же и попрекаете. Нехорошо, сударь...

---

Действительно, нехорошо. Мир, в котором следствия могут предшествовать причинам, решительно ни на что не годится. Приходится признать, что мир № 1 пал жертвой закона причинности.

## *ЧАСТЬ II*

# *МИР НОМЕР ВТОРОЙ*

### *9. НАУЧНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ФАНТАЗИИ (Н. О. Ф)*

На развалинах мира № 1 необходимо поставить вопрос: возможен ли вообще такой мир, в котором вещи сами по себе не имеют длины, явления не имеют длительности и нет абсолютной последовательности событий. Не обречен ли всякий мир этого рода на гибель от столкновения с законом причинности?

Мы утверждаем, что подобный мир возможен. Чтобы доказать это, нужно его построить, т. е. придумать. Но как придумать мир? Попробуйте, читатель, выдумать что-либо новое: сказку, сюжет для рассказа приключений, узор для обоев, рисунок для ситца, музыкальную мелодию. Если вы не исключительно одаренный творческим воображением человек, то убедитесь, что фантазия ваша тяжело и неуклюже топчется на месте, цепляясь за обрывки старого — слышанного, виденного, читанного, — и громоздит из них нечто скорее нелепое, чем фантастическое. Наша „крылатая фантазия“, увы, нуждается в костылях.

Как помочь беде? В эпоху Научной Организации Труда (НОТ) и Научной Организации Быта (НОБ) естественно заняться Научной Организации Фантазии (НОФ).

Математики придумали четвертое измерение, неевклидовы геометрии, мнимые числа и т. п. диковинки. Все это, быть может, очень скучные вещи, но по смелости и оригинальности они оставляют далеко позади самые счастливые идеи авторов фантастических романов. Неужели же сухие профессора-математики наделены более богатым воображением, чем профессиональные мастера выдумки — писатели? Разумеется, нет. Но писатели кустарничают, а профессора фантазируют научно.

Мы должны последовать примеру математиков и обратиться к Научной — скажем точнее — к Математической Организации Фантазии. Некоторый опыт в этом деле у нас уже есть: мир № 1 был придуман математически. Он создан тем, что мы (устами мистера Барнэя) задали правило графического изображения событий этого мира с точки зрения разных наблюдателей; движущихся друг относительно друга. Вся наша выдумка заключалась в том, что мы приняли, будто ось пространства наблюдателя всегда должна быть перпендикулярна к его оси времени. Почему непременно перпендикулярна? Вопрос незаконный. Фантазия имеет свои права; из них основное — право выдумывать все, что угодно, лишь бы выдумка не привела к логическому абсурду или к столкновению с законом причинности. Правило, положенное в основу графического построения мира № 1, привело к такому столкновению. Значит, оно было неудачно. Приходится его отбросить и подыскать другое правило, опять-таки совершенно произвольное, но способное ужиться с законом причинности.

## *10. ПОСТРОЕНИЕ МИРА № 2*

**Каждый наблюдатель оценивает место и время любого события, происшедшего на его дороге, по своим осям пространства и времени $OX$ и $OY$. Эти оси могут быть и не перпендикулярны одна другой (черт. 111).**

Чтобы изобразить графически событие $A$, которое произошло через два часа после начального события $O$, на расстоянии 200 км от него, наблюдатель поступает так: отсчитывает по оси времени вверх от точки $O$ два деления (каждое деление соответствует в принятом нами масштабе одному часу) и проводит прямую параллельную оси пространства: это геометрическое место точек изображающих события, происшедшие с точки зрения данного наблюдателя через 2 часа после начального момента. Затем отсчитывает по пространственной оси, вправо от точки $O$, 2 деления (каждое деление соответствует в принятом нами масштабе 100 км) и проводит прямую, параллельную оси времени: это геометрическое место точек, изображающих события, которые произошли с точки зрения наблюдателя на расстоянии 200 км от начального события. На пересечении прямых $BB'$ с $CC'$ лежит точка-событие, интересующее нас. Легко понять, что прямая $OA$ явится графиком движения точки, которая в началь-

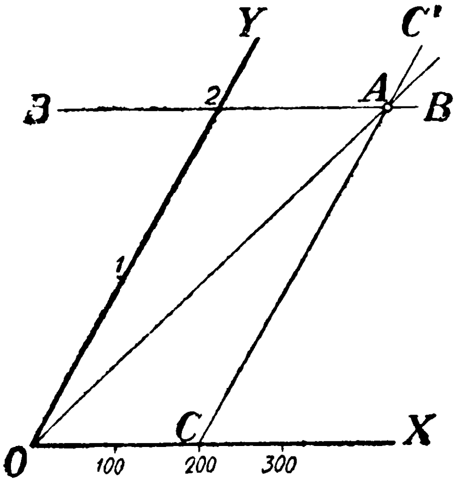



Рис. 111.

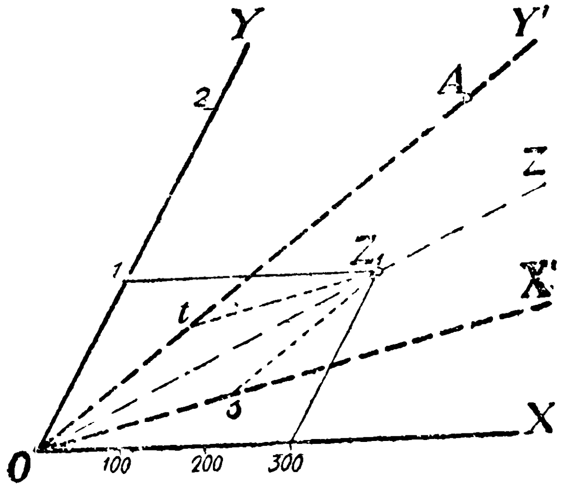



Рис. 112.

ный момент $O$ находилась рядом с нашим наблюдателем и движется со скоростью 100 км в час.

Прямая $OУ$ есть график движения самого наблюдателя. Станем теперь на точку зрения другого наблюдателя, который движется вместе с точкою $A$. Прямая $OA$, график его движения, является его осью времени. Какую прямую принять за его ось пространства? Мы отказались от требования, что ось пространства должна быть перпендикулярна оси времени, на чем настаивал Барнэй. Но мы не последуем и за Гарвудом, который предлагал принять, что ось пространства для всех наблюдателей одна и та же. Введем для ее выборановое условие (черт. 112). Проведем биссектрису угла $XOУ$ (прямая $OZ$). Оси пространства и времени первого наблюдателя симметричны относительно $OZ$. Установим такое общее правило: *ось пространства всегда должна быть симметрична оси времени относительно прямой* $OZ$. Таким образом для второго наблюдателя осью пространства будет прямая $OX'$.

Что изображает собою прямая $OZ$? Она является графиком какого-то движения. С точки зрения первого наблюдателя скорость этого движения равна 800 км в час. С точки зрения второго наблюдателя точка $Z$ проходит за промежуток времени, изображенный отрезком $Ot$, расстояние, изображенное отрезком $Os$, равным $Ot$. Вопрос о масштабе на осях времени и пространства второго наблюдателя оставляем пока открытым, но установим одно: соотношение между масштабными единицами для осей времени и пространства должно быть одинаково, т. е. отрезок, изображающий 1 час на оси времени, должен быть равен отрезку, изображающему 300 км на оси пространства. В таком случае относительно второго наблюдателя прямая $OZ$ тоже является графиком движения, происходящего со скоростью 300 км в час. Это движение играет совсем особую роль в нашем мире: все наблюдатели, как бы они ни двигались, оценивают его скорость совершенно одинаково: 300 км в час.

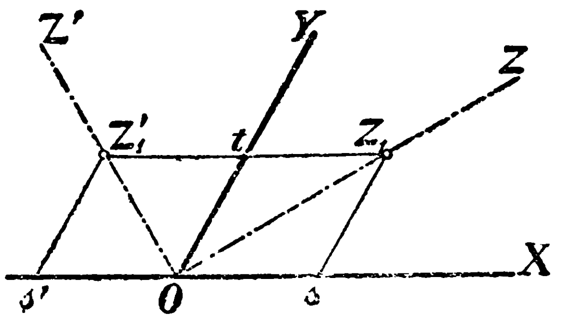



Рис. 113.

Проведем еще биссектрису угла, смежного с углом $XOY$ ($OZ'$ на чертеже 113). Что изображает эта прямая? С точки зрения нашего наблюдателя за промежуток времени, измеренный отрезком $Ot$, точка $Z'_1$ прошла расстояние, измеренное отрезком $Os'$, который равен отрезку $Os$, измеряющему расстояние, пройденное точкой $Z_1$ за тот же промежуток времени, но имеет противоположное направление. Значит, с точки зрения нашего наблюдателя, $Z_1'$ движется, с такой же скоростью, как $Z_1$ но в обратную сторону: $Z_1$, скажем, вперед, $Z'_1$ назад. Таким образом, все наблюдатели, независимо от того, как они движутся друг относительно друга, определят скорость точки $Z_1'$ в минус 300 км в час.

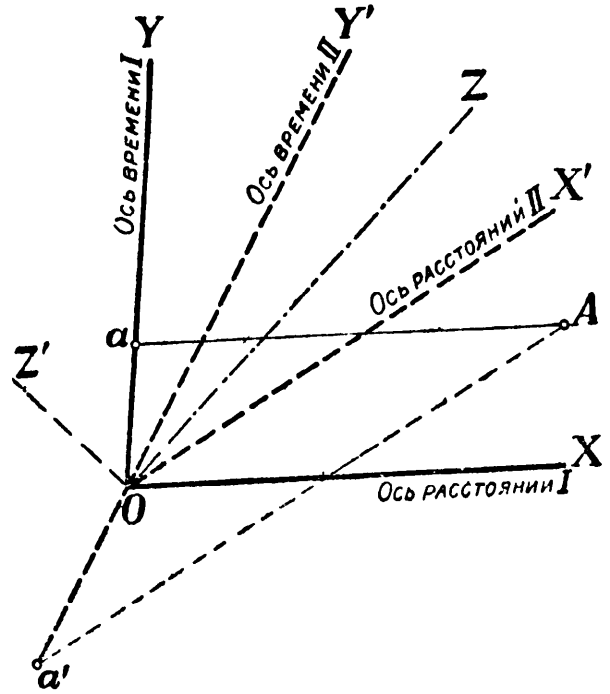



Рис. 114.

Относительно этой скорости — 300 км в час — мы примем еще, что она является **п р е д е л ь н о й** в нашем мире: ничто не может двигаться здесь быстрее. Это значит, что графики всех движений должны лежать внутри угла $ZOZ'$. Здесь, стало быть, должны находиться прямые, изображающие оси времени разных наблюдателей. Все оси пространства будут лежать вне этого угла.

Основные законы мира № 2 установлены. Мы можем сейча перейти к выводам, но прежде всего необходимо убедиться в том, что нашему миру не грозит опасность со стороны закона причинности.

Событие $A$ (черт. 114) с точки зрения одного наблюдателя произошло в момент $a$ — позже, чем $O$. С точки зрения другого наблюдателя оно произошло в момент $a'$ — раньше чем $O$. Таким образом, последовательность событий $O$ и $A$ зависит от скорости наблюдателя. Если бы событие $O$ могло быть причиной события $A$, то оказалось бы, что с точки зрения второго наблюдателя следствие предшествует причине: мир № 2 разделил бы печальную участь мира № 1. Если бы, например, событие $O$ представляло собою выстрел, а $A$ — убийство, произведенное им, то с точки зрения второго наблюдателя убийство произошло бы до его совершения. Однако, в этом случае прямая $OA$ была бы графиком движения пули; стало быть, скорость пули была бы выше предельной, что по основному закону, установленному для мира № 2, невозможно. Закон о предельной скорости спасает нас от столкновений с законом причинности.

Итак, мир № 2 вполне жизнеспособен, т. е. свободен от внутренних противоречий. Некогда на вопрос, почему всемогущий бог сотворил мир в 6 дней, один американец ответил: „Вследствие технической отсталости строительного искусства, такая скорость считалась в те времена рекордной“. Сейчас этот библейский рекорд побит. Правда, мы не создали ни хлябей небесных, ни тверди земной, ни звезд, ни планет, — зато построили пространство и время, — чего, по библии, не сделал сам бог.

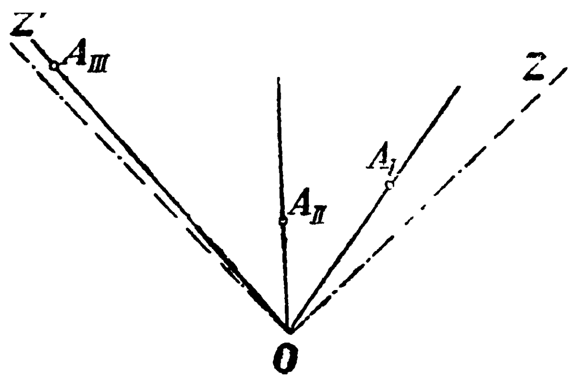


Рис. 115.

Чтобы закончить построение нового мира, остается установить правило для определения масштабов на новых осях времени и пространства. Постараемся выполнить это наиболее разумным образом. Представьте себе, что несколько путешественников I, II, III и т. д. встретились на нашей дороге и в этот момент все поставили свои часы на ноль. Это событие на черт. 115 отмечено точкой $O$. Затем наши путешественники расходятся. Стрелки их часов движутся, и вот часы путешественника $A$ показывают 1 час. Это событие (место и время его) отмечено на нашем графике точкой $A_I$. Таким же образом точка $A_{II}$ изображает собой аналогичное событие с часами II, точка $A_{III}$ — с часами III и т. д. Нет никаких оснований полагать, что все эти события одновременны с точки зрения одного из путешественников, потому что, если бы это и было так, — все равно они не были бы одновременны для других путешественников: ведь то, что одновременно для одного, не одновременно для другого. Как же установить положение точек $A_I$, $A_{II}$, $A_{III}$ и т. д.? Очевидно, одну из них, скажем $A_I$, можно выбрать произвольно: тем самым мы выбираем масштаб чертежа. Сделав это, постараемся определить положение точки $A_{II}$. Станем для этого на точку зрения такого наблюдателя $B$, относительно которого путешественники I и II движутся с равными скоростями, но в прямо противоположные стороны, Наблюдатель $B$ полагает, что часы I и II должны одновременно (с его точки зрения, конечно) показывать одно и то же время, иначе он вынужден был бы признать, что ход часов зависит не только от скорости, с которой они движутся относительно него, но еще и от того, в какую с т о р о н у они движутся. Мы вынуждены признать предположение $B$ вполне разумным. В таком случае точки $A_I$ и $A_{II}$ должны лежать на прямой, параллельной пространственной оси наблюдателя $B$ (черт. 116).

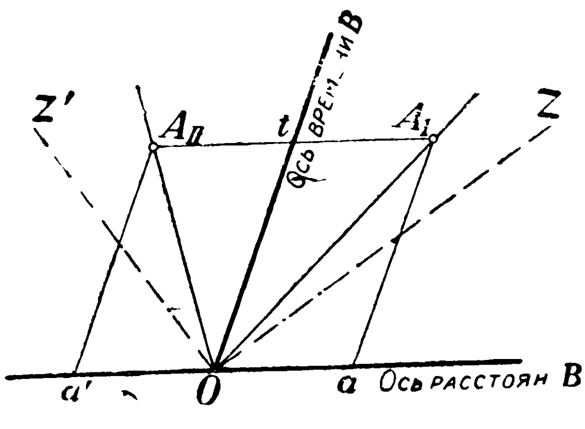



Рис. 116.

Совершенно таким же образом можно построить точки $A_{III}$, $A_{IV}$ и т. д. Если выполнить построение, окажется, что все эти точки

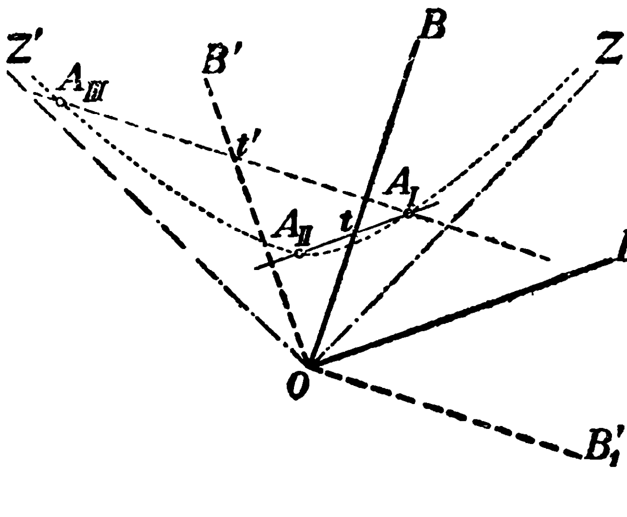



Рис. 117. $OB$—ось времени, $OB_1$—соответствующая ей ось расстояний. Точно также $OB'$ и $OB'_1$—оси времени и расстояний другого путешественника. Точка $A_{II}$ построена с помощью осей $OB$ и $OB_1$: проведена прямая $A_It$, параллельная $OB_1$; на ней отложен отрезок $tA_{II}$, равный $A_It$. Таким же образом с помощью осей $OB'$ и $OB_1'$ построена точка $A_{III}$. С помощью новых осей можно построить еще сколько угодно точек $A_{IV}$, $A_V$ и т. д.

лежат на кривой, изображенной на черт. 117. Эта кривая представляет собою ветвь так называемой равнообочной гиперболы. С помощью нашей гиперболы мы можем установить масштабы на осях времени подобно тому, как ранее для этой цели нам служила окружность. Совершенно так же, с помощью другой гиперболы, можно установить масштабы на осях расстояний.

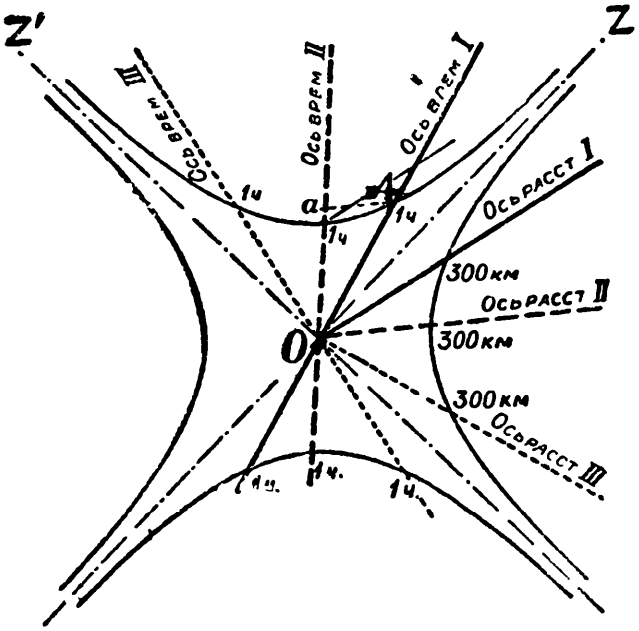


Рис. 118.

Ясно, что в мире № 2, как и в погибшем мире № 1, длительность является понятием относительным. Так, для путешественника II промежуток времени между событиями $O$ и $A$ равен (приблизительно) 70 минутам, а для путешественника I — одному часу (черт. 117). Наоборот, один час путешественника II с точки зрения I равен 70 минутам. Каждый из них считает, что часы другого отстают.

Как видите, здесь имеет место явление, обратное тому, которое происходило в мире № 1, где каждый путешественник полагал, что часы всех других уходят. Точно также относительными являются понятия одновременности и длины.

## 11. ПУТЕШЕСТВИЕ НОВОГО ГАРВУДА

Мы можем тепер переселить в новый мир нашего героя—Гарвуда.

Было бы, однако, слишком скучно заставить его проделать все сначала и слишком жестоко подвергать его пошатнувшийся разум дополнительным испытаниям. Ограничимся кратким описанием путешествия нового Гарвуда из гостиницы нового Барнэя в новый Град.

На черт. 118 точка $O$ изображает отъезд Гарвуда № 2 из гостиницы в город, точка $A$—прибытие мистера Гарвуда № 2 в город, точка $B$—отправление его в обратный пут и точка $C$—возвращение в гостиницу.

Точки $O$ и $C$ изображают нашу гостиницу в разные моменты; поэтому прямая $OC$ есть геометрическое место точек, изображающих гостиницу. Точно так же $BA$ есть геометрическое место точек, изображающих город. Так как город и гостиница неподвижны друг относительно друга, прямые $BA$ и $CO$ параллельны. Точки прямой $OA$ изображают Гарвуда № 2 по дороге в город.

Точки прямой $BC$ изображают его же на обратном пути.

Допустим, что вместе с Гарвудом № 2 из гостиницы отправляется в город сигнал, идущий с предельной скоростью (скажем, радиотелеграмма об отъезде нашего путешественника).

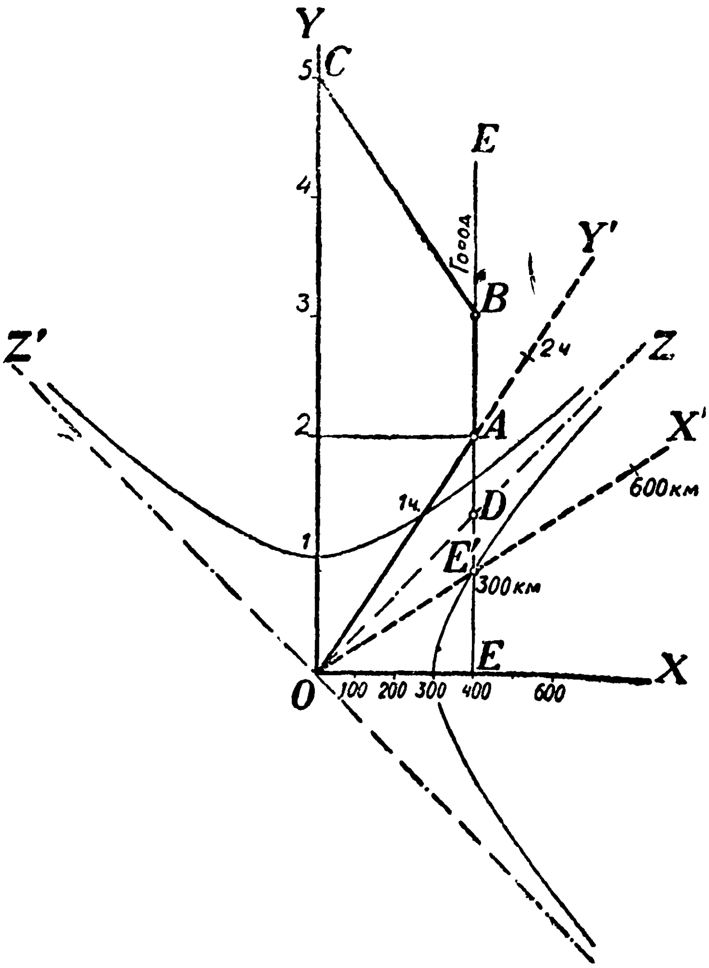


Рис. 119.

Отправление сигнала изображает точка $O$. Прибытие его в город пусть будет представлено точкой $D$. Прямая $OZ$— график предельной скорости. Перпендикулярная к ней прямая $OZ'$ изображает предельную скорость в противоположном направлении.

Проведем, наконец, масштабные гиперболы для времени и пространства и приступим к словесному описанию изображенных событий.

Станем прежде всего на точку зрения наблюдателя, неподвижного относительно гостиницы.

Чтобы взглянуть его глазами на происходящее, нужно привести события к его осям координат.

Прямая $OC$, точки которой изображают наблюдателя в разные моменты является его осью времени. Симметричная ей прямая $OX$—его ось пространства. С его точки зрения, расстояние до города изображено отрезком $OE$ и равно 400 км. Путешественник прибыл в город через 2 часа после отъезда. [1]

Иначе происходило дело с точки зрения самого путешественника. Его ось времени прямая $OA$; стало быть, ось пространства $OX'$. Расстояние от гостиницы до города изображается отрезком $OE'$ и равно 300 км. В город он прибыл через полтора часа после отъезда из гостиницы. Таким образом, длина, под которой движущийся наблюдатель воспринимает дорогу между гостиницей и городом, меньше, чем длина, под которой ту же дорогу воспринимает наблюдатель, неподвижный относительно нее. Точно также промежуток времени, под которым путешественник воспринимает свое путешествие, меньше, чем промежуток времени, под которым то же путешествие воспринимает наблюдатель, движущийся относительно первого. Значит, в мире № 2 предметы не имеют длины, и явления не имеют длительности: длина, под которой наблюдатель, движущийся относительно стержня, видит стержень, м е н ь ш е (в мире № 1 она была больше), чем длина, под которой тот же стержень представляется наблюдателю, неподвижному относительно него. Аналогичным образом обстоит дело и с промежутками времени, под которыми разные наблюдатели воспринимают одно и то же явление: наблюдателю, неподвижному относительно места, в котором явление совершается, оно представляется под наибольшим проме-

[1] Ради отчетливости чертежа мы приняли скорость нового Гарвуда равной 200 км в час и изменили также другие числовые данные.

жутком времени (в мире № 1 наоборот — под наименьшим).

Встречные прохожие представляются мистеру Гарвуду № 2 не вытянутыми в направлении движения, а сплюснутыми (рис. 120).

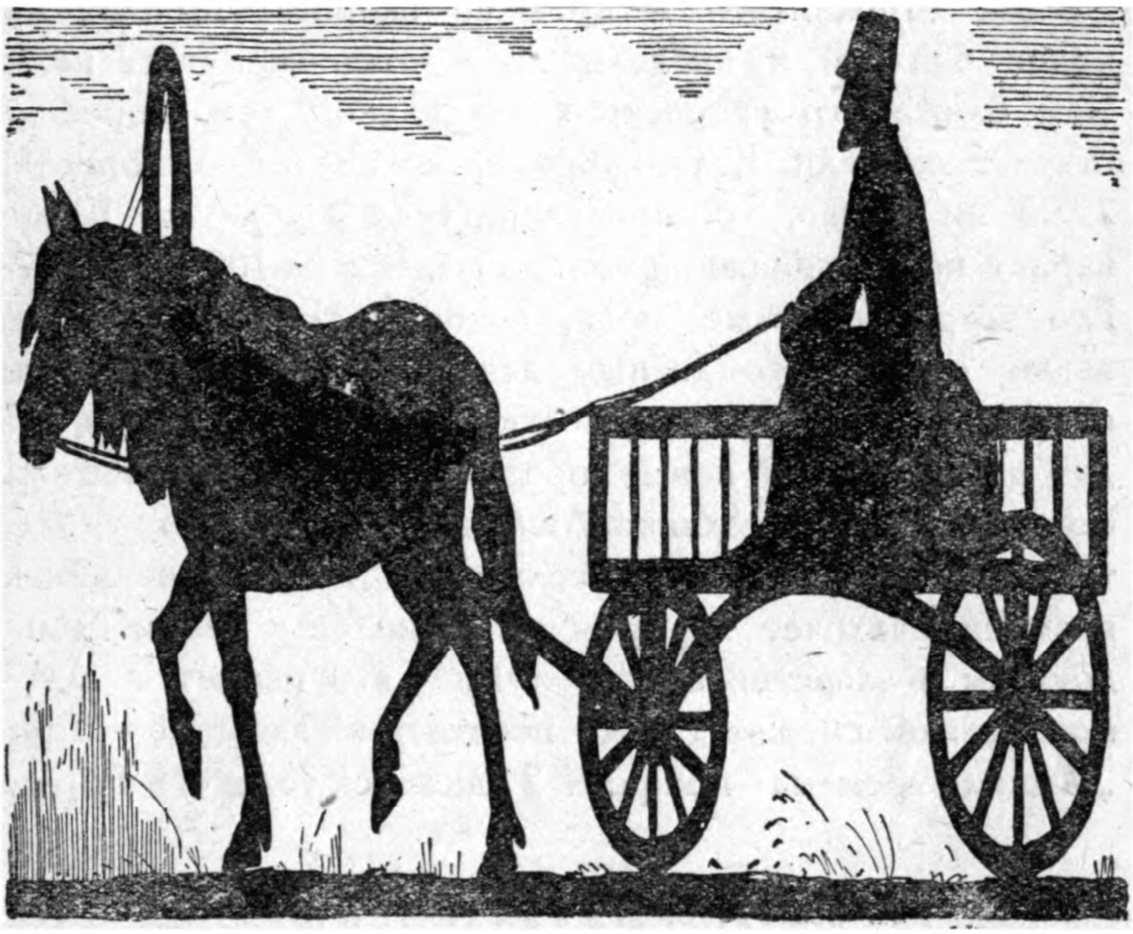


Рис. 120. В мире № 2. Колеса, катясь, оставались растянутыми сверху вниз.

Молоко, которое взял с собой новый Гарвуд, оказалось по возвращении свежее, чем молоко того же удоя, оставшееся в гостинице. Сам мистер Гарвуд, проведя в пути 3 часа и в городе 1 час, вернулся в гостиницу, которая постарела к его возвращению на 5 часов. Таким образом мистер Гарвуд прожил под промежутком времени в 4 часа то, что обитатели гостиницы прожили под промежутком в 5 часов. Если бы он путешествовал дольше и быстрее, экономия во времени оказалась бы более значительной.

Любой обитатель мира № 2, которому захотелось бы узнать, что будет через 100 лет, может удовлетворить свое любопытство, „прыгнув в будущее“. Для этого он должен отправиться в путь со скоростью более или менее близкой к предельной, и затем вернуться назад. Чем ближе его скорость к предельной, тем скорее достигнет он цели. Если, например, он поедет со скоростью 298,5 км в час, то, проездив (туда и обратно) 10 лет, найдет по возвращении жизнь ушедшей на 100 лет вперед. Его встретят новые люди, которые только по книгам знают о том, что давным давно, 100 лет тому назад, отправился в дорогу „путешественник в будущее“. Он увидит новые здания, новые города, новые обычаи, новые достижения науки и техники. Любопытство его будет удовлетворено в полной мере. Но если этот „путешественник во времени“ захочет вернуться в прошлое к своим былым друзьям и сверстникам, то — увы — это окажется невозможным: он сможет только посетить их забытые могилы. „Машина времени“ в мире № 2 движется только в п е р е д.

## 12. СЛОВО ПРЕДОСТАВЛЯЕТСЯ ФАКТАМ

Как ни удивителен мир № 2, он чрезвычайно похож на действительный мир, в котором мы живем; только предельная скорость на самом деле равна не 300 км в час, а 300 000 км в с е к у н д у. Вот и все различие. Те странные явления, которые происходят с путешественниками в мире № 2, происходят и с нами, когда мы едем в трамвае, в поезде, на автомобиле. Но масштаб этих изменений иной, чем в мире № 2, ибо скорости, с которыми мы передвигаемся, составляют ничтожно малую долю предельной скорости. Часы в движущемся поезде действительно отстают сравнительно с часами на станции, но на перегоне от Ленинграда до Москвы это отставание не превысит 0,000 000 000 2 долей секунды: никакими, самыми точными измерениями не может быть оно обнаружено. Для пассажира, едущего из Ленинграда в Москву, размеры всех предметов, расположенных неподвижно относительно железнодорожного полотна или находящихся во встречном поезде, являются укороченными в направлении движения, но если поезд мчится (лучше сказать— ползет) со скоростью 100 км в час, то длина всего пути от Ленинграда до Москвы представляется пассажиру укороченной на 3-миллионные доли миллиметра. Обнаружить подобное изменение длины невозможно.

Какое же право имеем мы утверждать, что такие абсолютно неощутительные изменения длины и длительности происходят в действительности?

Это право дает нам один замечательный опыт, который около 50 лет тому назад поверг в великое смущение всех физиков.

Когда встречаются два поезда, из которых один идет со скоростью $v_1$, а другой со скоростью $v_2$, то скорость одного поезда относительно другого равна $v_1+v_2$. Если же один поезд обгоняет другой, то относительная скорость их равна $v_1-v_2$. На том же основании можно было бы ожидать, что скорость света относительно наблюдателя, который движется навстречу световому лучу, должна быть больше, а относительно наблюдателя, удаляющегося от источника света, меньше, чем относительно неподвижного наблюдателя. Именно, если скорость света относительно неподвижного наблюдателя обозначить через $c$, а скорость наблюдателя через $v$, то в первом случае (встречное движение) наблюдатель найдет, что свет движется относительно него со скоростью $c+v$, а во втором, что свет обгоняет его со скоростью $c-v$.

Этого следовало ожидать, согласно обычным представлениям.

Но в 1881 г. американский исследователь Майкельсон произвел свой знаменитый опыт, на основании которого пришлось сделать вывод, что скорость света относительно наблюдателя **не зависит от того, движется ли наблюдатель навстречу лучу или удаляется в противоположную сторону.**

Объяснить этот неожиданный результат, оставаясь при старом представлении о строении нашего мира, невозможно; но результат этот совершенно понятен, если наш мир устроен, как мир № 2. Мы уже говорили, что в мире № 2 существует **предельная скорость**, которую все наблюдатели, как бы ни двигались они друг относительно друга, оценивают совершенно одинаково. Стоит только принять, что наш мир есть мир № 2 и что свет распространяется с **предельной скоростью**,— и загадка, которую поставил перед нами Майкельсон, разрешится сама собой.

Именно такое объяснение неожиданного результата опыта Майкельсона и предложил Альберт Эйнштейн.

Так появилась (в 1904 г.) „специальная теория относительности". Впоследствии (в 1916 г.) Эйнштейн, развивая свою теорию, пришел к выводу, что конструкция мира зависит от наличия тяготеющих масс, так что только в частях пространства, весьма удаленных от крупных небесных тел, строение мира совпадает с конструкцией мира № 2; вблизи же небесных тел оно отличается от конструкции этого мира тем сильнее, чем выше в данном месте напряжение тяготения. Вблизи земной поверхности отступление действительных свойств пространства и времени от свойств пространства и времени мира № 2 чрезвычайно незначительно, так как напряжение тяжести на земле сравнительно весьма мало.

Мы не можем здесь входить в изложение этой „общей теории относительности“ и будем вполне удовлетворены, если статья наша поможет читателю усвоить основную идею Эйнштейна: вещи сами по себе *не имеют длины*, явления не имеют *длительности*; разные наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, оценивают по-разному длину одного и того же предмета и длительность одного и того же явления.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Ответств. редактор *Н. А. Энгель.* Технич. редактор *Е. И. Вольфсон.* Сдано в набор 17/VI 32 г. Подп. к печати 25/VIII 32 г. Ст. формат $82^1/_2 \times 110$ см. Издание № 14. Типогр. знаков в 1 бум. листе 117.504. Ленгорлит № 53854. Тираж 15.000 экз. $3^1/_2$ бум. листов. Зак. № 1693.

Типография „Печатня". Прачечный пер., д. № 6. Тел. № 1-25-06.