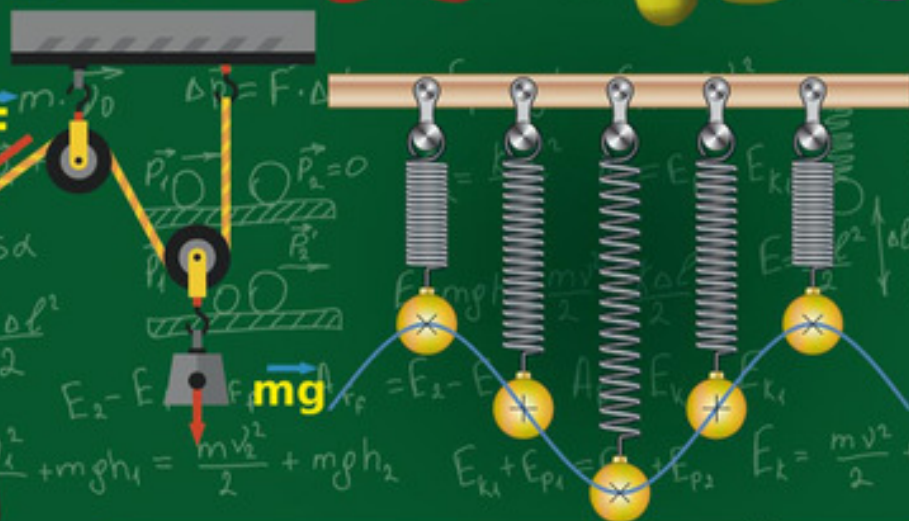


Азбука науки

для юных гениев

Яков Перельман  
Занимательная

МЕХАНИКА



Азбука науки для юных гениев

Яков Перельман

**Занимательная механика**

«Центрполиграф»

1930

УДК 531/534  
ББК 22.3

**Перельман Я. И.**

Занимательная механика / Я. И. Перельман — «Центрполиграф»,  
1930 — (Азбука науки для юных гениев)

ISBN 978-5-9524-5241-1

Очередная книга знаменитого популяризатора наук с помощью образных примеров и увлекательных задач заново знакомит юных читателей с уже встречавшейся им в школе механикой – одним из разделов физики, – а взрослым помогает освежить ее в памяти и, возможно, увидеть с другой стороны. Не как сухие тексты учебников, а как глубинные законы, которым подчиняется все на нашей планете и постигать которые по-настоящему интересно. С помощью науки объясняются самые невероятные и фантастические предположения; живые примеры, сравнения и факты из повседневности – все это помогает в постижении движущих сил мироздания. Наглядно поданные основы механики будут полезны любому человеку, желающему расширить свой кругозор.

УДК 531/534

ББК 22.3

ISBN 978-5-9524-5241-1

© Перельман Я. И., 1930  
© Центрполиграф, 1930

# Содержание

Предисловие редакции	5
Глава 1	7
Задача о двух яйцах	7
Путешествие на деревянном коне	9
Здравый смысл и механика	10
Поединок на корабле	11
Аэродинамическая труба	13
На полном ходу поезда	14
Коперник и Птолемей	16
Как надо понимать закон инерции	18
Действие и противодействие	20
Задача о двух лошадях	24
Задача о двух лодках	25
Загадка пешехода и паровоза	28
Что значит преодолеть инерцию?	29
Железнодорожный вагон	30
Глава 2	31
Справочная таблица по механике	31
Отдача огнестрельного оружия	35
Знание обиходное и научное	38
Пушка на Луне	39
Наган на дне океана	41
Сдвинуть земной шар	43
Ложный путь изобретательства	46
Где центр тяжести летящей ракеты?	49
Глава 3	50
Свидетельства отвеса и маятника	50
Маятник в воде	56
На наклонной плоскости	57
Когда горизонтальная линия не горизонтальна?	59
Магнитная гора	63
Реки, текущие в гору	64
Конец ознакомительного фрагмента.	65

# Занимательная МЕХАНИКА

**Яков Перельман**  
**Занимательная механика**

## **Предисловие редакции**

Яков Исидорович Перельман никогда не был учёным в прямом значении этого слова – не совершал научных открытий, не имел званий и степеней, однако всю свою жизнь посвятил науке. Он никогда не считал себя писателем, но его книги выходили такими большими тиражами, что составили целую научно-популярную библиотеку. Став первым в стране популяризатором физики, геометрии, математики и астрономии, основоположником занимательной науки, одним из первых писателей жанра научно-популярной литературы, он успевал заниматься ещё множеством самых разных дел – преподавал, создавал новые учебные программы, редактировал журналы, участвовал в работе научных обществ, постоянно выступал с докладами.

Популяризацией науки задолго до Перельмана занимались многие авторы, но только он достиг в этом деле огромного мастерства, сумев точно нащупать его секреты и выработать «фирменный» стиль повествования. Профессор физики Петербургского университета Орест Данилович Хвольсон, познакомившись с Перельманом и узнав, что книга написана не учёным-физиком, а учёным-лесоводом, сказал Якову Исидоровичу: «Лесоводов-учёных у нас предостаточно, а вот людей, которые умели бы так писать о физике, как пишете вы, нет вовсе. Мой вам настоятельный совет: продолжайте, обязательно продолжайте писать подобные книги и впредь».

В чём же секрет произведений Перельмана? Именно он мастерски умел оперировать сухими цифрами, знал, как с помощью неожиданно простого и понятного сравнения привлечь внимание читателя к сложным научным фактам и явлениям природы. Он сохранил в себе способность удивляться и подмечать в обыденных вещах то, чего не видит большинство людей, и умел увлекательно рассказывать об этом другим. Я.И. Перельман впервые в России предложил перевести стрелку часов на час вперёд в целях экономии горючего, разработал проект первой советской противораковой ракеты, а в середине 30-х годов он задумал и создал удивительный музей – «Дом занимательной науки», экспонаты которого поражали своими возможностями. Так, простые торговые весы могли без труда отгадать любое задуманное число и фамилию. Даже буфет «Дома занимательной науки» был устроен с разными причудами. Наряду с обычной здесь попадалась и «оперельманенная» посуда. Из бутылки, стоящей в битом льду, наливали кипящий чай, а чайная ложка таяла быстрее сахара, который она размешивала.

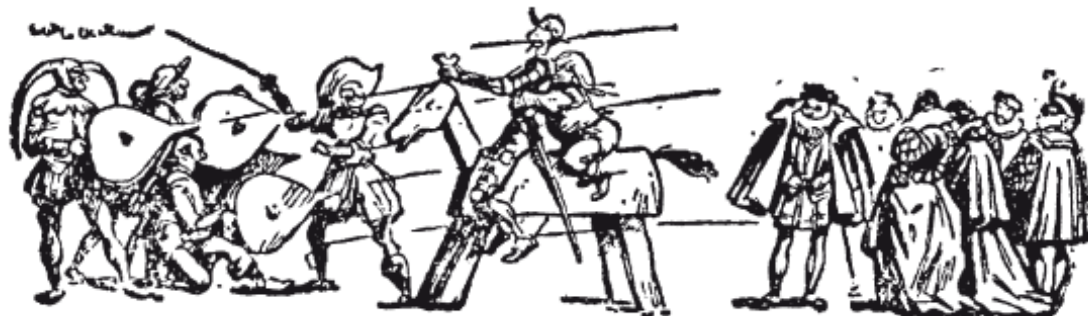
Вклад Перельмана в образование трудно переоценить: с 1913 года его книги только на русском языке переиздавались более 300 раз тиражом почти 15 миллионов экземпляров. Библиография Перельмана насчитывает более 1000 статей и заметок, опубликованных им в различных изданиях. И это помимо 47 научно-популярных, 40 научно-познавательных книг, 18 школьных учебников и учебных пособий. Книги Я.И. Перельмана 126 раз издавались в 18 зарубежных странах на более чем 15 языках.

\* \* \*

«Занимательная механика» Я.И. Перельмана впервые была выпущена в 1930 году ленинградским издательством «Время» и с тех пор многократно переиздавалась.

Перед вами книга, по тексту соответствующая четвёртому изданию, вышедшему в 1937 году. Текст практически не претерпел изменений относительно использованных в нём реалий, лишь были внесены необходимые пояснения, учитывающие достижения современной науки. «Занимательная механика» продолжает знакомство читателя с физикой посредством живых примеров, сравнений и фактов, взятых из окружающей нас повседневности. Непростые вопросы, как и всегда у Перельмана, подаются в виде интересных задач, что не просто помогает понять, как работает мир, но и делает постижение науки невероятно увлекательным. Наглядно и образно поданные основы механики будут полезны не только юному, но и взрослому читателю, развивающему свой кругозор.

## Глава 1 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 был некогда поставлен американским журналом «Наука и изобретения». Журнал утверждал, что, согласно опыту, разбивается чаще «то яйцо, которое *двигалось*», другими словами – яйцо *ударяющее*.

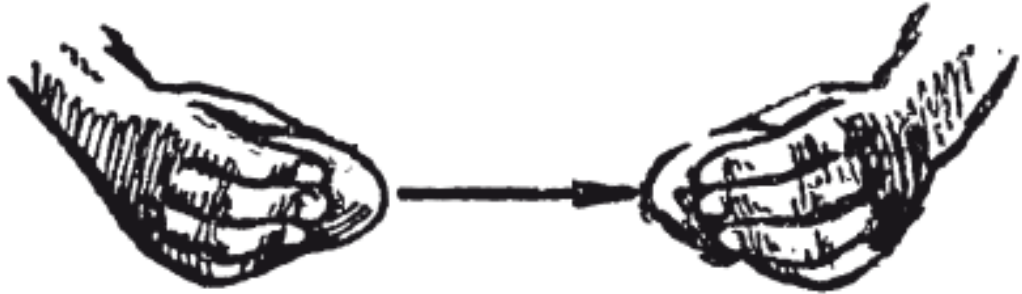
«Скорлупа яйца, – пояснялось в журнале, – имеет кривую форму, причём давление, приложенное при ударе к неподвижному яйцу, действует на его скорлупу снаружи; но известно, что, подобно всякому своду, яичная скорлупа хорошо противостоит давлению извне. Иначе обстоит дело, когда усилие приложено к яйцу *движущемуся*.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

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

Одни из решающих доказывали, что разбиться должно непременно *ударяющее* яйцо, другие – что именно оно-то и уцелеет. Доводы казались одинаково правдоподобными, и тем не менее оба утверждения в корне ошибочны! Установить рассуждением, которое из соударяющихся яиц должно разбиться, вообще невозможно, потому что между яйцами ударяющим и ударяемым различия не существует. Нельзя ссылаться на то, что ударяющее яйцо движется, а ударяемое неподвижно. Неподвижно – по отношению к чему? Если к земному шару, то ведь известно, что планета наша сама перемещается среди звёзд, совершая десяток разнообразных движений; все эти движения ударяемое яйцо разделяет так же, как и ударяющее, и никто не скажет, которое из них движется среди звёзд быстрее. Чтобы предсказать судьбу яиц по признакам движения и покоя, понадобилось бы перевернуть всю астрономию и определить движение каждого из соударяющихся яиц относительно неподвижных звёзд. Да и это не помогло бы, потому что отдельные видимые звёзды тоже движутся, и вся их совокупность, Млечный Путь, перемещается по отношению к иным звёздным скоплениям.

Яичная задача, как видите, увлекла нас в бездны мироздания и всё же не приблизилась к разрешению. Впрочем, нет, приблизилась, если звёздная экскурсия помогла нам понять ту важную истину, что движение тела без указания другого тела, к которому это движение относится, есть попросту бессмыслица. Одинокое тело, взятое само по себе, двигаться не может, могут перемещаться только *два тела* — взаимно сближаться или взаимно удаляться. Оба соударяю-

щихся яйца находятся в одинаковом состоянии движения: они взаимно сближаются, – вот всё, что мы можем сказать об их движении. Результат столкновения не зависит от того, какое из них мы пожелаем считать неподвижным и какое – движущимся.



*Рис. 1.* Какое яйцо разобьётся?

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

## Путешествие на деревянном коне

Из сейчас сказанного следует, что состояние равномерного прямолинейного движения неотличимо от состояния неподвижности при условии обратного *равномерного* и прямолинейного движения окружающей обстановки. Сказать: «Тело движется с постоянной скоростью» и «Тело находится в покое, но всё 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 друг друга. Мысль эта усвоена далеко не всеми, кто имеет дело с механикой и физикой. А между тем она не чужда была уже автору «Дон Кихота», жившему в XVI веке и не читавшему Галилея. Ею проникнута одна из забавных сцен произведения Сервантеса – описание путешествия прославленного рыцаря и его оруженосца на деревянном коне.

«– Садитесь на круп лошади, – объяснили Дон Кихоту. – Требуется лишь одно: повернуть втулку, вделанную у коня на шее, и он унесёт вас по воздуху туда, где ожидает вас Маламбуно. 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 несётся по воздуху «быстрее стрелы».

«– Готов поклясться, – заявил Дон Кихот оруженосцу, – что во всю жизнь мою не ездил я на коне с более спокойной поступью. Всё идёт, как должно идти, и ветер дует.

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

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

Деревянный конь Сервантеса – прообраз многочисленных аттракционов, придуманных для развлечения публики на выставках и в парках. То и другое основано на полной невозможности отличить состояние покоя от равномерного движения<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее, говоря о равномерном движении, автор имеет в виду равномерное *прямолинейное* движение. В случае равномерного поворота на нас действуют силы и ускорения, которые можно ощутить. (Примеч. ред.)

## Здравый смысл и механика

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

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

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

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

«Пока движение поезда остаётся 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 оно исключает возможность абсолютного решения вопроса о наличии равномерного движения или покоя и оставляет место только для изучения равномерного движения тел *относительно* друг друга, так как участие наблюдателя в равномерном движении не отражается на наблюдаемых явлениях и их законах».

## Поединок на корабле

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

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

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

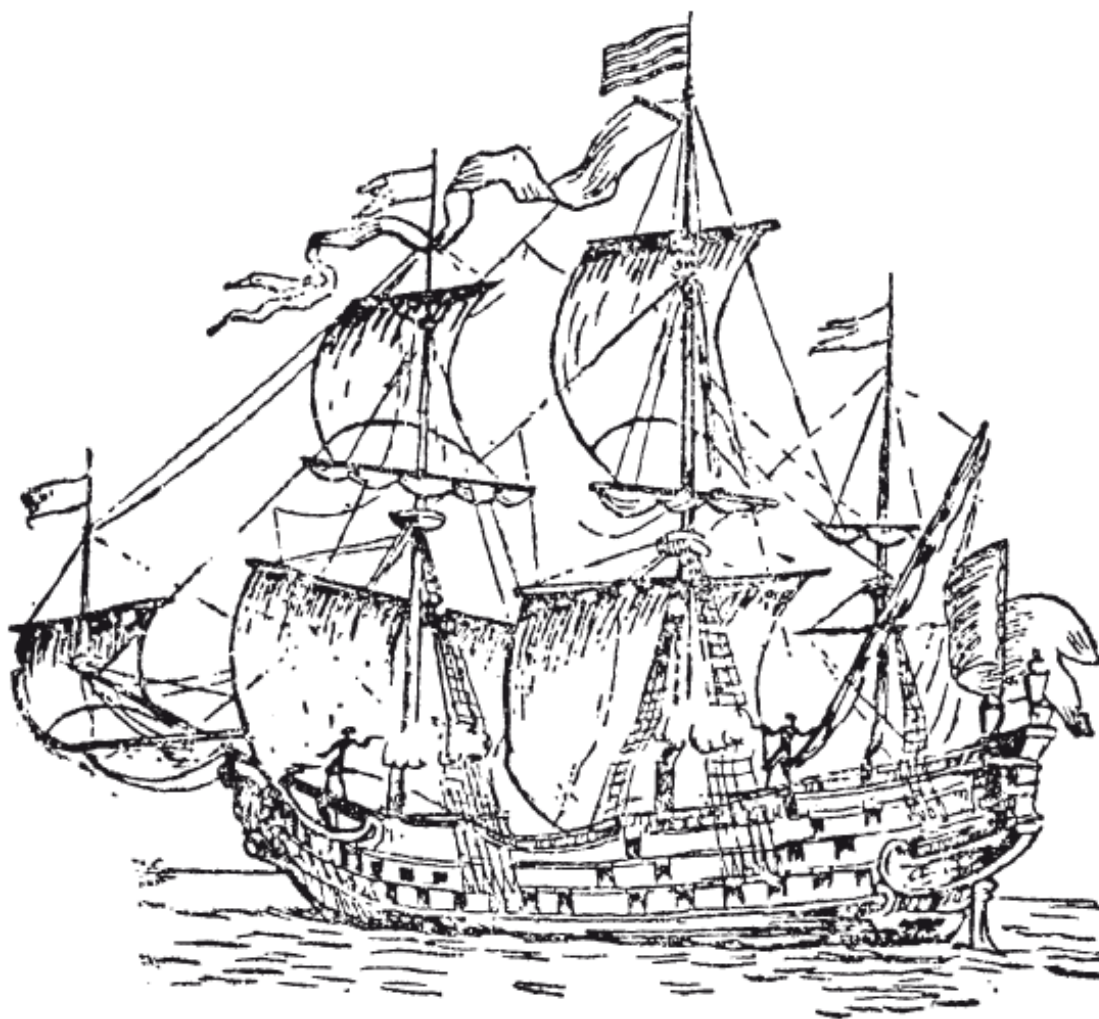


Рис. 2. Чья пуля раньше достигнет противника?

Здесь уместно привести отрывок из той книги Галилея, где был впервые высказан классический принцип относительности (книга эта, к слову сказать, едва не привела её автора на костёр 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 корабль или стоит на месте. Прыгая, вы будете покрывать по полу те же расстояния, что и на неподвижном корабле. Вы не сделаете вследствие быстрого движения корабля больших прыжков к корме, чем к носу корабля, хотя, пока вы находитесь в воздухе, пол под вами бежит к части, противоположной прыжку. Бросая вещь товарищу, вам не нужно с большей силой кидать её 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 система в покое или перемещается прямолинейно и равномерно».

## Аэродинамическая труба

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

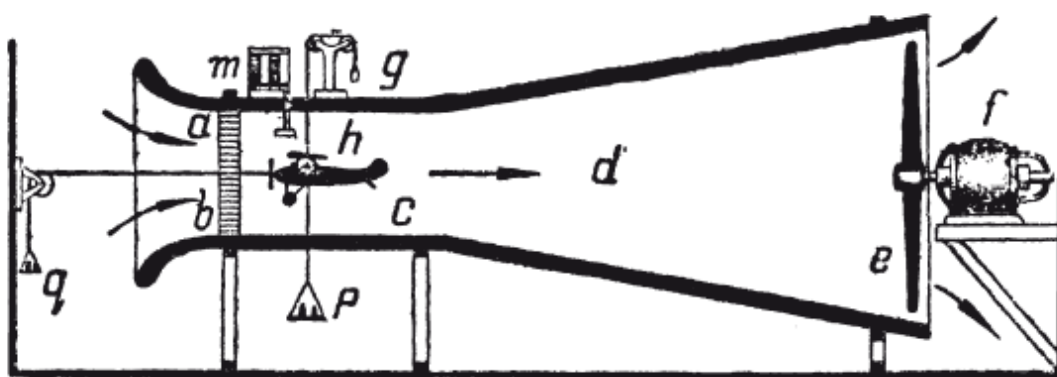


Рис. 3. Разрез аэродинамической трубы ЦАГИ

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

Читателю будет интересно узнать, что одна из крупнейших в мире аэродинамических труб устроена в Москве в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ). Она имеет восьмиугольную форму; длина её 50 м, а поперечник в рабочей части – 6 м. Благодаря таким размерам в ней уместится не уменьшенная лишь модель, а корпус настоящего аэроплана с пропеллером или целый автомобиль в натуральную величину. Более крупная аэродинамическая труба сооружена во Франции, её эллиптическое сечение имеет размеры 16 × 18 м.

## На полном ходу поезда

Другой пример плодотворного применения классического принципа относительности беру из заграничной железнодорожной практики. В Англии и в Америке тендер<sup>2</sup> нередко пополняется водой на полном ходу поезда. Достигается это остроумным «обращением» одного общеизвестного механического явления, а именно: если в поток воды погрузить отвесно трубку, нижний конец которой загнут против течения (рис. 4), то текущая вода проникает в эту так называемую трубку Пито и устанавливается в ней выше уровня реки на определённую величину  $H$ , зависящую от скорости течения. Железнодорожные инженеры «обратили» это явление: они двигают загнутую трубку в *стоячей* воде, и вода в трубке поднимается выше уровня водоёма. Движение заменяют покоем, а покой – движением.

Осуществляют это так: на станции, где тендер паровоза должен, не останавливаясь, запасть водой, устраивают между рельсами длинный водоём в виде канавы (рис. 4). С тендера спускают изогнутую трубу, обращённую отверстием в сторону движения. Вода, поднимаясь в трубе, подаётся в тендер быстро мчащегося поезда (рис. 4 *вверху справа*).

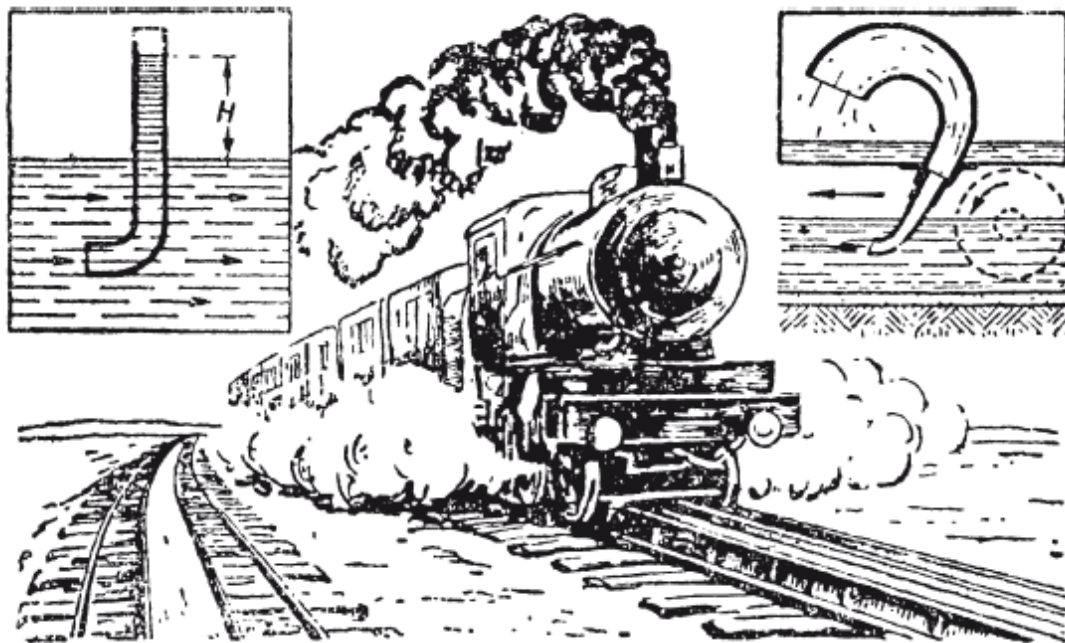


Рис. 4. Как паровозы в Америке на полном ходу набирали воду Между рельсами устраивался длинный водоём, в который погружалась из тендера труба

*Вверху слева* – труба Пито. При погружении её в текущую воду уровень в трубке поднимается выше, чем в водоёме

*Вверху справа* – применение трубы Пито для набора воды в тендер движущегося поезда

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

<sup>2</sup> Тендер – специальный вагон, прицепляемый к паровозу и предназначенный для перевозки запаса топлива для локомотива (дров, угля или нефти) и воды.

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

где  $V$  — скорость воды,  $g$  — ускорение силы тяжести, равное 9,8 м в секунду за секунду ( $\text{м/с}^2$ ). В нашем случае скорость воды по отношению к трубе равна скорости поезда; взяв скромную скорость 36 км/ч, имеем  $V = 10$  м/с; следовательно, высота поднятия воды:

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

Ясно, что, каковы бы ни были потери на трении, высота поднятия более чем достаточна для успешного наполнения тендера<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> В «Занимательной физике» (кн. 2) я применил тот же приём «обращения» к случаю взаимного притяжения кораблей на море. Это вызвало возражение отсюда, откуда меньше всего можно было его ожидать: со стороны специалиста-физика, автора брошюры, популяризирующей 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 вперёд наука, если бы в каждом частном случае применения общих законов необходимо было обращаться к новым опытам!

## Коперник и Птолемей

У читателя, без сомнения, уже родился вопрос: как же с точки зрения классического принципа относительности надо разрешать спор Коперника и Птолемея о движении Земли? Хотя в этом случае речь идёт не о *прямолинейном* движении, и, следовательно, вопрос попадает в область учения Эйнштейна, мы всё же не оставим его здесь без рассмотрения<sup>4</sup>.

Итак, что вокруг чего обращается<sup>5</sup>: Земля вокруг Солнца или Солнце вокруг Земли?<sup>6</sup>

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.

Послушаем выдающегося физика Эддингтона: «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, – 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 своём вращательном движении подставляет лучам Солнца то место, в котором я нахожусь». Для определения времени дня воззрение Птолемея *удобнее* Коперника, и мы без колебания становимся в этом случае на точку зрения древнего грека. Кто вздумал бы описывать солнечный восход в терминах учения Коперника, тот не сразу был бы понят даже самым убеждённым коперниканцем.

Астрономы, предвычисляя те или иные небесные явления, часто вовсе не думают о движении земного шара: им удобнее вести расчёты так, как будто всё небо обращается вокруг неподвижной Земли<sup>7</sup>.

Читатель не забыл, вероятно – а может, и в самом деле успел забыть, – что поводом к так далеко отвлёкшей нас беседе послужила задача об ударяющихся яйцах. Вспомнив об этом, читатель поймёт, что если бы по сломанной скорлупе можно было узнавать, какое из яиц находится в «истинном» движении и какое «в абсолютном» покое, то это было бы открытием мирового значения, настоящим переворотом в механике. Американский журнал, беспечно пола-

---

<sup>4</sup> Теория Эйнштейна затрагивает в первую очередь движения со скоростями, близкими к скоростям света, – при таком движении законы физики имеют форму, отличную от законов классической механики. Речь об этом пойдёт в последней главе книги. Прямолинейное ли движение или нет, роли не играет. (*Примеч. ред.*)

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> В настоящее время слово «обращение» практически не используют, вместо него принято вращение относительно внешней точки называть орбитальным вращением. (*Примеч. ред.*)

<sup>7</sup> Один из внимательных читателей поставил предо мной по этому поводу вопрос: «Какую картину движения увидит наблюдатель, рассматривающий нашу планетную систему извне, с какой-нибудь отдалённой звезды? Будет ли Земля для этого наблюдателя кружиться около Солнца или наоборот?» Отвечая на этот вопрос, надо прежде всего вспомнить, что абсолютно неподвижного наблюдательного пункта быть не может. Звезда, откуда смотрит наблюдатель, неподвижна относительно какого-либо другого тела. Если наблюдатель неподвижен относительно Солнца, то он увидит Землю, обращающуюся около Солнца. Если он неподвижен относительно Земли, то увидит Солнце, кружащееся около Земли. Если же он неподвижен относительно какого-либо третьего тела (например, другой звезды), то ему представятся движущимися – по тому или иному пути – и Солнце, и Земля.

гавший, что им установлено различие между соударяющимися яйцами, не подозревал, что он находился в преддверии вечной славы<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> В этой главе автор, наверное, намеренно упростил описание и проблему движения Солнца и Земли между собой. Во-первых, Земля движется вокруг Солнца не по кругу, а по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. В сочетании с вращением Земли вокруг своей оси это придаст Солнцу сложную – то приближающуюся, то отдаляющуюся – траекторию, сильно отличную от простой круговой. Во-вторых, Земля на самом деле вращается ещё и вокруг оси, проходящей через центр тяжести Земля – Луна. Такая ось, правда, проходит через саму Землю, но это вращение также усложнит орбиту Солнца относительно Земли. В-третьих, говоря о «правильности» и простоте описания движения Солнца согласно теориям Коперника и Птолемея, не стоит забывать о другой, не менее важной проблеме – описания движения планет. В птолемеической системе они совершают вокруг Земли сложные петли, описать которые математически – особенно в те времена – было очень сложно. В коперниковской же системе они вращаются вокруг Солнца по эллипсам – так же как и Земля, – и объяснение их траекторий, наблюдаемых с Земли, становится простым и наглядным. (*Примеч. ред.*)

## Как надо понимать закон инерции

Теперь, после того, как мы подробно побеседовали об относительности движения, необходимо сказать несколько слов о тех причинах, которые вызывают движение, – о силах. Прежде всего нужно указать на закон независимости действия сил, он формулируется так: *действие силы на тело не зависит от того, находится тело в покое или движется по инерции либо под влиянием других сил.*

Это следствие второго из трёх законов, которые положены Ньютоном в основу всей механики. Первый – закон инерции; третий – закон противодействия.

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

$$\vec{f} = m \times \vec{a},$$

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

Закон *инерции*, хотя и противоречит привычным представлениям, наиболее понятен из всех трёх<sup>9</sup>. Однако же иные понимают его совершенно превратно. Именно его формулируют нередко как свойство тел «сохранять своё *состояние*, пока внешняя причина не нарушит этого состояния». Такое распространённое 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 своё состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока действие сил не выведет его из такого состояния.*

Значит, каждый раз, когда тело

- 1) приходит в движение,
- 2) меняет своё прямолинейное движение на непрямолинейное или вообще движется по кривому пути,
- 3) прекращает, замедляет или ускоряет свое движение, мы должны заключить, что на тело действует *сила*.

Если же ни одной из этих перемен в движении не наблюдается, то на тело никакая сила не действует, как бы стремительно оно ни двигалось. Надо твёрдо помнить, что тело, движущееся равномерно и прямолинейно, вовсе не находится под действием сил (или же все действующие

<sup>9</sup> Противоречит он обыденным представлениям в той своей части, которая утверждает, что тело, движущееся равномерно и прямолинейно, не побуждается к этому никакой силой; привычный же взгляд тот, что, раз тело движется, оно поддерживается в этом состоянии силой, а при отнятии силы движение должно прекратиться.

на него силы уравниваются). В этом существенное отличие современных механических представлений от взглядов мыслителей древности и Средних веков (до Галилея). Здесь обыденное мышление и мышление научное резко расходятся.

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

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

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

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

## Действие и противодействие

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

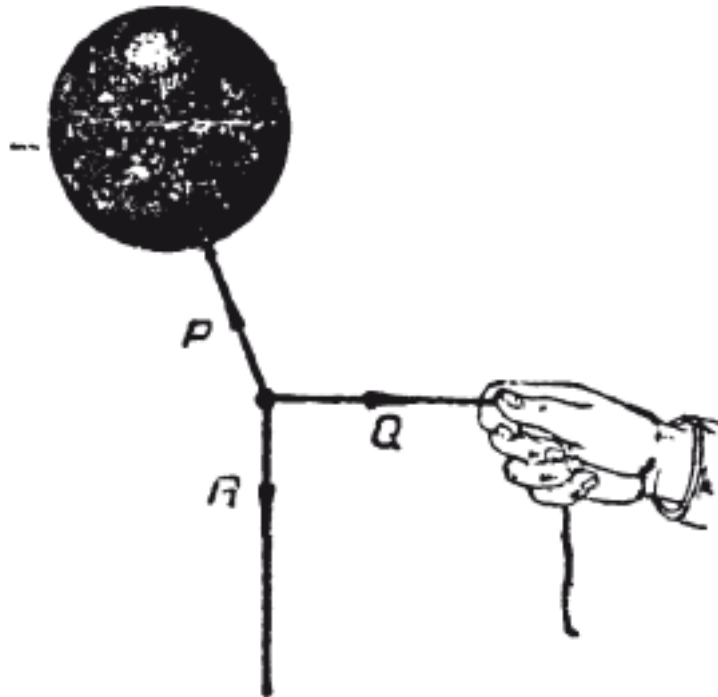


Рис. 5. Силы ( $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ), действующие на грузик детского воздушного шара. Где силы противодействующие?

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

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

Пусть вы рассматриваете (рис. 5) силы  $P$ ,  $Q$  и  $R$ , которые действуют на грузик, подвешенный к детскому воздушному шару. Тяга  $P$  шара, тяга  $Q$  верёвочки и вес  $R$  грузика – силы как будто одиночные. Но это лишь отвлечение от действительности; на самом деле для каждой из трёх сил имеется равная ей, но противоположная по направлению сила. А именно сила, противоположная силе  $P$ , приложена к воздушному шару (рис. 6, сила  $P_1$ ); сила, противоположная

силе  $Q$ , действует на руку; сила, противоположная силе  $R$ , приложена в центре земного шара (рис. 6, сила  $R_1$ ), потому что грузик не только притягивается Землёй, но и сам её притягивает.

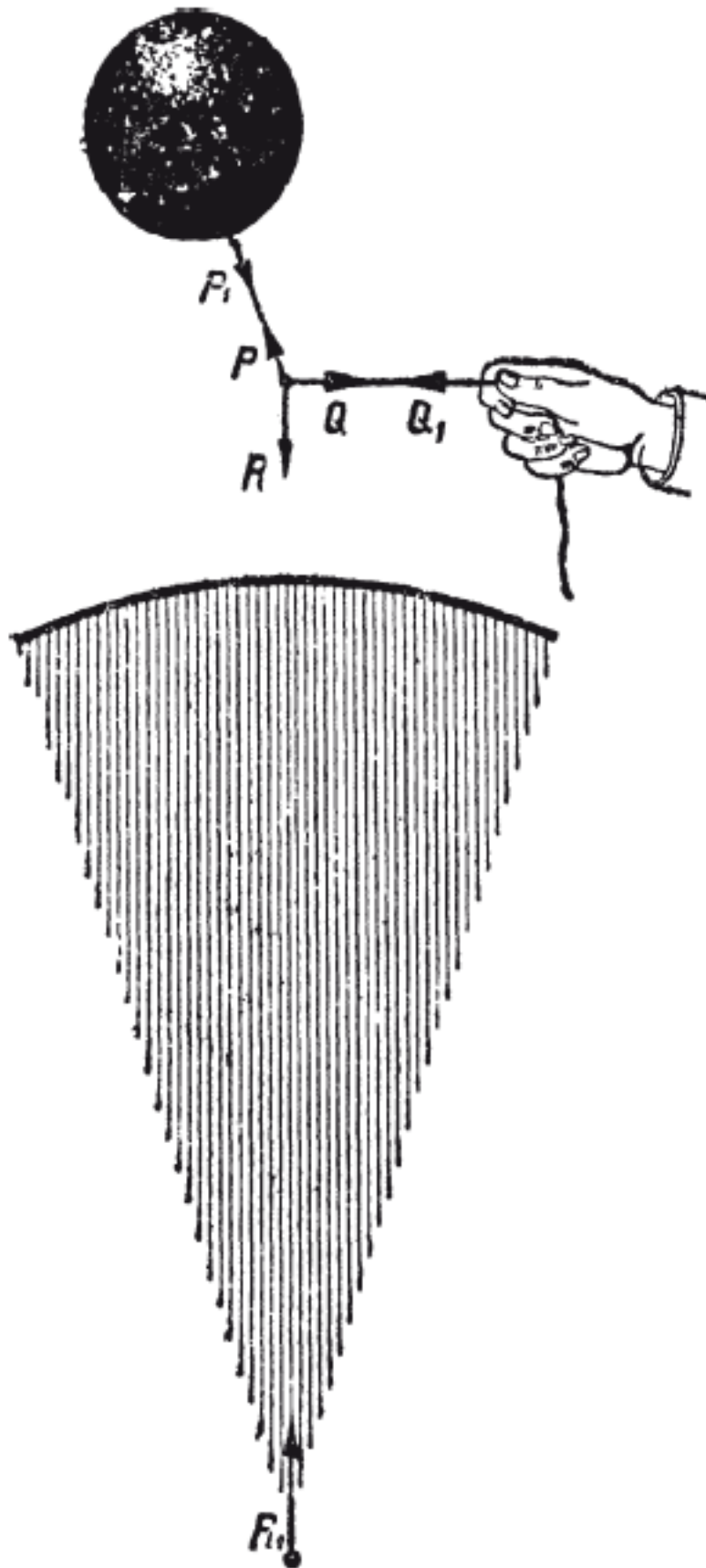


Рис. 6. Ответ на вопрос предыдущего рисунка:  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $R_1$  – силы противодействующие

Ещё одно существенное замечание. Когда мы спрашиваем о величине натяжения верёвки, концы которой растягиваются силами в 1 Н, мы спрашиваем, в сущности, о цене 10-копеечной почтовой марки. Ответ содержится в самом вопросе: верёвка натянута с силой 1 Н. Сказать «верёвка растягивается двумя силами в 1 Н» или «верёвка подвержена натяжению в 1 Н» – значит выразить буквально одну и ту же мысль. Ведь другого натяжения в 1 Н быть не может, кроме такого, которое состоит из двух сил, направленных в противоположные стороны. Забывая об этом, впадают нередко в грубые ошибки, примеры которых мы сейчас приведём<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Напомним, что величина, в которой измеряется сила, есть килограммы, умноженные на метры в секунду в квадрате ( $\text{кг} \times \text{м}/\text{с}^2$ ). Такая размерность используется в системе измерения СИ и носит название ньютонов, сокращённо Н.  $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \times \text{м}/\text{с}^2$ . Так, твёрдое тело массой 1 кг действовало бы на опору или подвес (например, на вашу руку) с силой  $1 \text{ кг} \times 9,8 \text{ м}/\text{с}^2 = 9,8 \text{ Н}$ . (Примеч. ред.)

## Задача о двух лошадях

Две лошади растягивают пружинный безмен<sup>11</sup> с силой 1000 Н каждая. Что показывает стрелка безмена?

### Решение

Многие отвечают:  $1000 + 1000 = 2000$  Н. Ответ неверен. Силы по 1000 Н, с какими тянут лошади, вызывают, как мы только что видели, натяжение не в 2000, а только в 1000 Н.

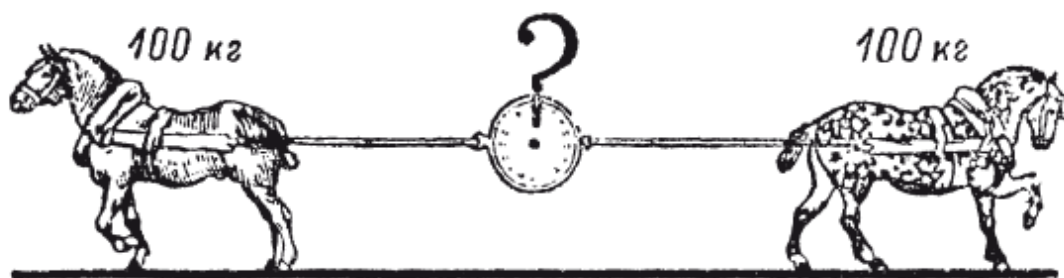


Рис. 7. Каждая лошадь тянет с силой 1000 Н. Сколько показывает пружинный безмен?

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

---

<sup>11</sup> Безмен – простейшие весы. В случае пружинного безмена представляют собой пружину, прикреплённую к измерительной шкале с одной стороны, и к которой с другой стороны подвешивается груз, массу которого хотят узнать. В зависимости от массы – при постоянной силе тяжести – пружина растягивается до определённого уровня, соответствие которого массе смотрят по измерительной шкале. (Примеч. ред.)

## **Задача о двух лодках**

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

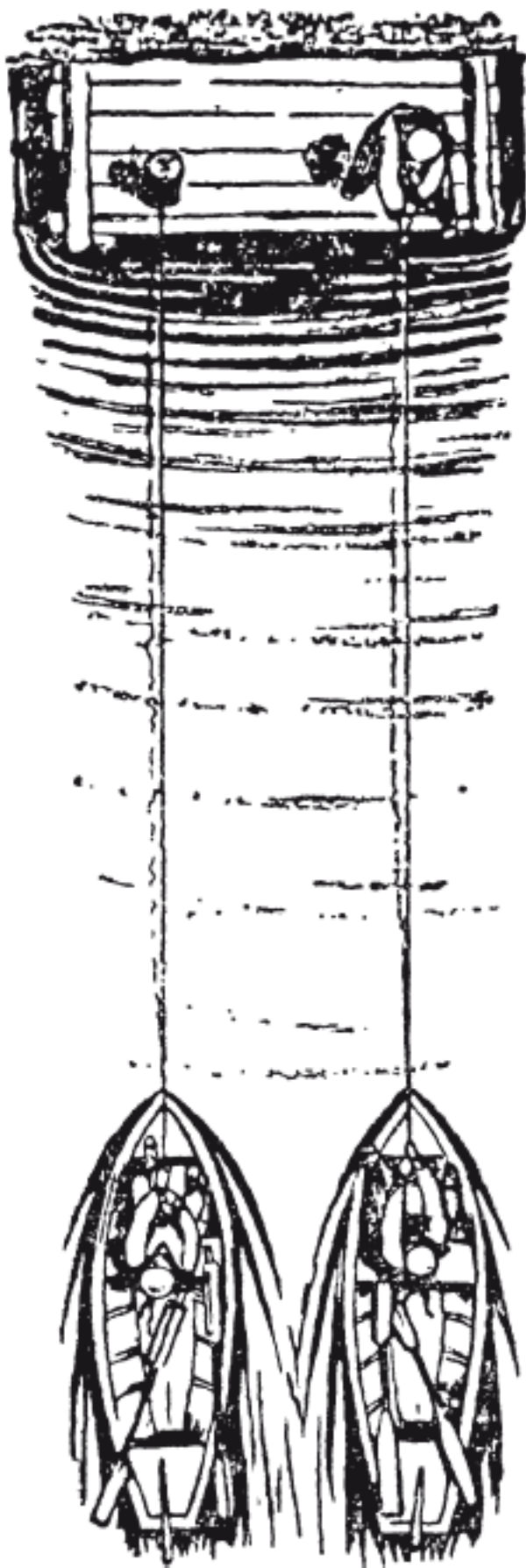


Рис. 8. Какая лодка причалит раньше?

Но верно ли, что на эту лодку действует *двойная сила*? Если и лодочник, и матрос оба тянут к себе верёвку, то *натяжение* верёвки равно силе только *одного* из них – иначе говоря, оно таково же, как и для первой лодки. Обе лодки подтягиваются с равной силой и причалят *одновременно*<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> 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* верёвки. А двое, конечно, за то же время выберут верёвки больше, и потому правая лодка причалит скорее». Этот простой довод, кажущийся на первый взгляд бесспорным, на самом деле ошибочен. Чтобы сообщить лодке двойную скорость (иначе лодка не пристанет вдвое быстрее), *каждый* из двоих тянущих должен тянуть лодку *с удвоенной силой*. Только при таком условии удастся им выбрать вдвое больше верёвки, чем одинокому (в противном случае – откуда возьмётся у них для этого свободная верёвка?). Но в условии задачи оговорено, что «все трое прилагают одинаковые усилия». Сколько бы двое ни старались, им не выбрать верёвки больше, чем одинокому, раз сила натяжения верёвок одинакова.

## Загадка пешехода и паровоза

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

Но если внутренние силы не способны перемещать всё тело, то как же движется пешеход? Как движется паровоз? Сказать, что пешеходу помогает трение ног о землю, а паровозу – трение колес о рельсы, не значит еще разрешить загадку. Трение, конечно, совершенно необходимо для движения пешехода и паровоза: известно, что нельзя ходить по очень скользкому льду и что паровоз на скользких рельсах вращает колеса, не двигаясь с места. Но известно и то, что трение – сила *пассивная* (с. 20), не способная сама по себе породить движение.

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

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

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

$$F_1, F_2, F_3$$

силы  $F_2$  и  $F_3$  полностью или частью уравниваются, и тогда сила  $F_1$  становится действующей.

Инженеры, описывая движение паровоза, предпочитают говорить, не вполне последовательно, что уравниваются силы  $F_1$  и  $F_2$ , а двигает паровоз сила трения  $F_3$ . Практически это, впрочем, безразлично, поскольку для движения паровоза необходимо участие и силы пара, и силы трения.

## Что значит преодолеть инерцию?

Закончим главу рассмотрением ещё одного вопроса, также зачастую порождающего превратные представления.

Приходится нередко читать и слышать, что для приведения покоящегося тела в движение надо прежде всего преодолеть инерцию этого тела. Мы знаем, однако, что свободное тело нисколько не сопротивляется стремлению силы привести его в движение. Что же тут надо «преодолевать»?

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

$$ft = mv,$$

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

## Железнодорожный вагон

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

Не только труднее, прибавлю я, но и вовсе невозможно, если прилагать небольшое усилие. Чтобы поддерживать равномерное движение пустого товарного вагона по горизонтальному пути, достаточно, при хорошей смазке, усилия в 150 Н. Между тем такой же неподвижный вагон не удаётся сдвинуть с места силой меньшей 600 Н.

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



## Глава 2

### Сила и движение



### Справочная таблица по механике

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

Покажем на нескольких примерах, как пользоваться табличкой.

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

Умножая силу  $f$  на путь  $S$ , получаем работу  $A$ , которая в то же время равна и полупро-

$$v : A = fS = \frac{mv^2}{2} \quad .^{13}$$

изведению массы  $m$  на квадрат скорости

<sup>13</sup> Формула  $A = fS$  верна лишь в том случае, когда направление силы совпадает с направлением пути. Вообще же имеет место более сложная формула  $A = fS \cos \alpha$ , в которой  $\alpha$  обозначает угол между направлениями силы и пути. Также и формула

	Скорость $v$	Время $t$	Масса $m$	Ускорение $a$	Сила $f$
Путь $S$	—	—	—	$\frac{v^2}{2}$ (равно- перем. движ.)	Работа $A = \frac{mv^2}{2}$
Скорость $v$	$2aS$ (рав- ноперем. движ.)	Путь $S$ (равно- мерн. движ.)	Импульс $ft$	—	Мощность $W = \frac{A}{t}$
Время $t$	Путь $S$ (равно- мерн. движ.)	—	—	Скорость $v$ (равно- перем. движ.)	Количе- ство дви- жения $mv$
Масса $m$	Импульс $ft$	—	—	Сила $f$	—

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

Скорость  $v$  равнопеременного движения, делённая на время  $t$ , равна ускорению  $a$  (фор-

мула  $a = \frac{v}{t}$ )

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

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

верна только в простейшем случае, когда начальная скорость тела равна нулю; если же начальная скорость равна  $v_0$ , а конечная —  $v$ , то работа, которую нужно затратить, чтобы вызвать такое изменение скорости, выражается формулой

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

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

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

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

$$v = at$$

$$f = ma,$$

а затем и формулу

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

Среди них ищите ту, которая отвечает условиям задачи.

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

$$fS = A \text{ (работа)}$$

$$fv = W \text{ (мощность)}$$

$$ft = mv \text{ (количество движения)}$$

$$f = ma.$$

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

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

Ещё важное замечание. Формулы механики полезны только в руках того вычислителя, который твёрдо знает, в *каких мерах* надо выразить входящие в них величины. Если, вычисляя работу по формуле  $A = fS$ , вы выразите силу  $f$  в ньютонах, а путь  $S$  – в сантиметрах, то получите величину работы в редко употребительных единицах – в ньютоно-сантиметрах и, конечно, легко можете запутаться. Чтобы получился надлежащий результат, сила должна быть выражена в *ньютонках*, а путь – в *метрах*, тогда работа получится в ньютоно-метрах, или, по-другому, в джоулях. Но вы можете выразить силу и в динах, а путь в сантиметрах, тогда результат покажет число эргов работы (дина – сила, равная 1/100 000 ньютона, т. е. 100 мН) – дино-сантиметров.

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

Умению выбирать единицы мер и безошибочно определять, в каких мерах получился результат, нельзя научиться в четверть часа. Кто этим умением ещё не обладает, тому следует во всех случаях пользоваться мерами системы «сантиметр – грамм – секунда» (СГС), а полученный результат, если нужно, переводить в другие меры<sup>14</sup>.

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

---

<sup>14</sup> На данный момент в российских школах физика, в своём большинстве, преподаётся в так называемой Международной системе единиц СИ (метр – килограмм – секунда). Однако на момент написания книги, а сейчас – физики на уровне университетов и науки, основной являлась система СГС (сантиметр – грамм – секунда). (*Примеч. ред.*)

## Отдача огнестрельного оружия

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

$$ft = mv.$$

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

$$mv = Mw,$$

откуда

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

Подставим в эту пропорцию числовые значения её членов. Масса пули старой военной винтовки – 9,6 г, скорость её при вылете – 880 м/с, масса винтовки – 4500 г. Значит,

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

Следовательно, скорость ружья примерно равна 1,9 м/с. Нетрудно вычислить, что отда-

ющее ружьё несёт с собой в 470 раз меньшую «живую силу»  $\left( \frac{mw^2}{2} \right)$ , нежели пуля; это значит, что разрушительная энергия ружья при отдаче в 470 раз меньше, нежели пули, хотя

– заметим это! – количество движения для обоих тел одинаково. Неумелого стрелка отдача может всё же опрокинуть и даже поранить.

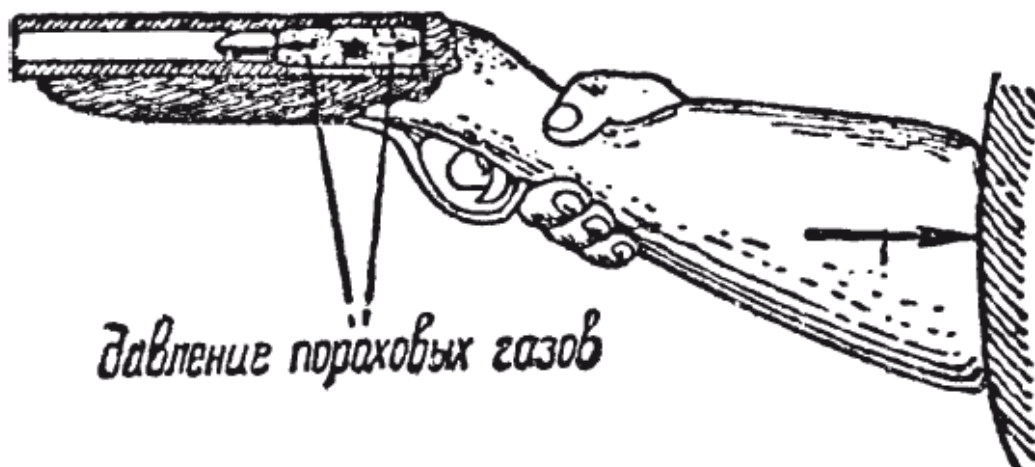


Рис. 9. Почему ружьё при выстреле отдаёт?

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

Читатель, вероятно, заметил, что в наших примерах тела, наделённые равными *количествами движения*, обладают далеко не одинаковой кинетической *энергией*.

В этом, разумеется, нет ничего неожиданного: из равенства

$$mv = Mw$$

вовсе не следует, что

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

Второе равенство верно лишь в том случае, когда  $v = w$  (в этом легко убедиться, разделив второе равенство на первое). Между тем среди людей, не изучавших механику систематически, весьма распространено неправильное убеждение, будто равенство количеств движения (а значит, и равенство импульсов) обуславливает собой равенство кинетической энергии. Многие изобретатели-самоучки, как я заметил, исходят из того, что равным импульсам соответствуют

равные количества *работы*. Это ведёт, конечно, к плачевным неудачам и лишней раз доказывает необходимость для изобретателя хорошо усвоить основы теоретической механики.

## Знание обиходное и научное

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



Рис. 10

Механика говорит, однако, совершенно другое. Она учит, что постоянная сила порождает движение не равномерное, а *ускоренное*, так как к скорости, ранее накопленной, сила непрерывно добавляет новую скорость. При равномерном же движении тело *вовсе не находится под действием силы*, иначе оно двигалось бы неравномерно (см. с. 20).

Неужели же обиходные наблюдения так грубо ошибочны?

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

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

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

## Пушка на Луне

### Задача

Артиллерийское орудие сообщает снаряду на Земле начальную скорость 900 м/с. Перенесите его мысленно на Луну, где все тела становятся в 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 на Луне приходится ей на шестеро более лёгкий снаряд, то сообщённая скорость должна быть там в 6 раз больше, чем на Земле:  $900 \times 6 = 5400$  м/с. Снаряд вылетит на Луне со скоростью 5,4 км/с.

Подобный ответ при кажущемся его правдоподобии совершенно неверен.

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

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

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

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

которую мы находим в справочной табличке (с. 31). Так как ускорение силы тяжести на

$$a = \frac{g}{6}$$

Луне в 6 раз меньше, чем на Земле, т. е. , то формула получает вид:

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

Отсюда пройденный снарядом отвесный путь

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

На Земле же (при отсутствии атмосферы):

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

Значит, на Луне пушка закинула бы ядро в 6 раз выше, чем на Земле (сопротивление воздуха мы не принимали во внимание), несмотря на то что начальная скорость снаряда в обоих случаях одинакова.

## Наган на дне океана

Для этой задачи взята также необычная обстановка – дно океана. Глубочайшее место океана, какое удалось промерить – Марианская впадина, – находится близ Антильских островов – 11 000 м.

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

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

Итак, выстрелит ли наган на дне океана?

### Решение

Задача сводится к решению вопроса: какое давление на пулю больше – пороховых газов изнутри или воды океана снаружи? Последнее рассчитать несложно: каждые 10 м водяного столба давят с силой одной атмосферы, т. е. 1 кг на 1 см<sup>2</sup>. Следовательно, 11 000 м водяного столба окажут давление в 1100 атмосфер, или больше тонны на 1 см<sup>2</sup>.

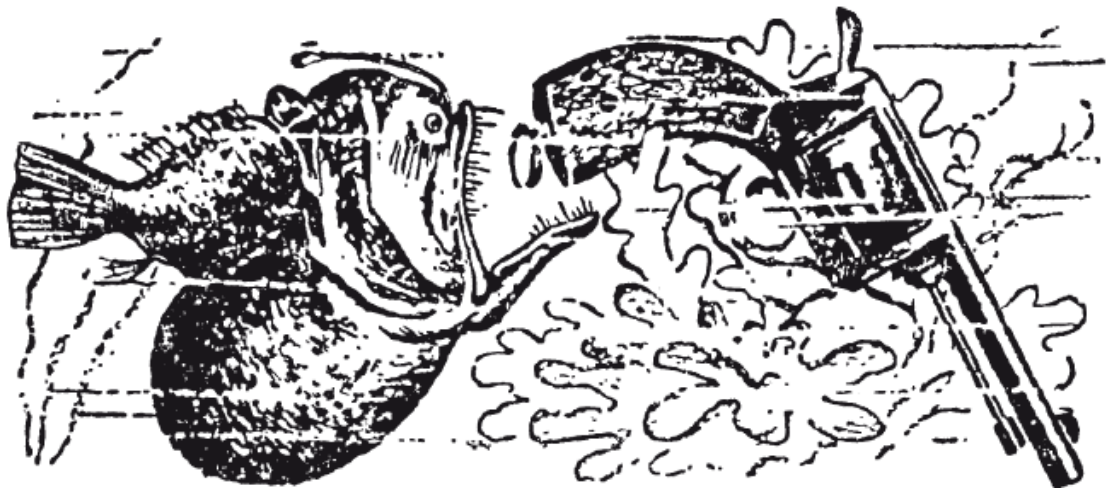


Рис. 11. Выстрелит ли наган на дне океана?

Теперь определим давление пороховых газов. Прежде всего вычислим силу, движущую пулю. Для этого найдём *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  $v = 270 \text{ м} = 27\,000 \text{ см/с}$ ,  $S = 22 \text{ см}$ , имеем

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

$$\text{ускорение } a = 16\,500\,000 \text{ см/с}^2 = 165 \text{ км/с}^2.$$

Огромная величина ускорения (среднего) –  $165 \text{ км/с}^2$  – не должна нас удивлять, ведь пуля проходит путь по каналу нагана в ничтожный промежуток времени, который тоже поучительно вычислить. Расчёт выполняем по формуле  $v = at$ :

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

откуда время

$$t = \frac{27}{16\,500} = \text{ОКОЛО } \frac{1}{600} \text{ с.}$$

Мы видим, что за 600-ю долю секунды скорость пули должна возрасти от 0 до 270 м/с. Ясно, что за целую секунду прибавка скорости, так стремительно нарастающей, должна быть огромна.

Но вернёмся к расчёту давления. Узнав величину ускорения пули (вес которой, напомним, 7 г), мы легко вычислим действующую на неё силу, применив формулу  $f = ma$ :

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

В ньютоне круглым счётом миллион дин (дина – около миллиграмма  $\times \text{ м/с}^2$ ), значит, на пулю действует сила в 115 Н. Чтобы вычислить давление в килограммах на  $1 \text{ см}^2$ , надо знать, по какой площади эта сила распределяется. Площадь равна поперечному сечению канала револьвера (диаметр канала 7 мм = 0,7 см):

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

Значит, на  $1 \text{ см}^2$  приходится давление в

$$115 : 0,38 = \text{около } 300 \text{ Н/см}^2.$$

Итак, пуля в момент выстрела выталкивается давлением в 300 атмосфер<sup>15</sup> против давления океанских вод, превышающего тысячу атмосфер. Ясно, что пуля не двинется с места. Порох вспыхнет, но не вытолкнет пули. Пуля нагана, пробивающая на воздухе (с 35 шагов) 4 —5-дюймовых досок кряду, здесь бессильна «пробить» воду.

<sup>15</sup> 1 атмосферное давление приблизительно равно 0,1 МПа, где 1 паскаль =  $1 \text{ Н/м}^2$ . Таким образом,  $300 \text{ Н/см}^2 = 300 \times 10\,000 \text{ Н/м}^2 = 300 \times 10\,000 \text{ Па} = 30 \text{ МПа} = 300 \text{ атмосфер}$ . (Примеч. ред.)

## Сдвинуть земной шар

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

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

Последнее выражение говорит, что ускорение может быть равно нулю только в том случае, когда сила равна нулю. Поэтому *всякая сила должна заставить двигаться любое свободное тело*.

В окружающих нас условиях мы не всегда видим подтверждение этого закона. Причина – трение, вообще сопротивление движению. Другими словами, причина та, что перед нами очень редко бывает тело *свободное*: движение почти всех наблюдаемых нами тел не свободно. Чтобы в условиях трения заставить тело двигаться, необходимо приложить силу, которая больше силы трения. Дубовый шкаф на сухом дубовом полу только в том случае придёт в движение под напором наших рук, если мы разовьём силу не меньше  $\frac{1}{3}$  веса шкафа, потому что сила трения дуба по дубу (насухо) составляет 34 % веса тела. Но если бы никакого трения не было, то даже ребёнок заставил бы двигаться тяжёлый шкаф прикосновением пальца.

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

Но вот вопрос: какова окажется *скорость* этого движения? Мы знаем, что ускорение, приобретаемое телом под действием данной силы, тем меньше, чем больше масса тела. Если деревянному крокетному шару мы силой своих рук можем сообщить ускорение в несколько десятков метров в секунду за секунду, то земной шар, масса которого неизмеримо больше, получит от такой же силы неизмеримо меньшее ускорение. Мы говорим: «неизмеримо больше», «неизмеримо меньше», конечно, не в буквальном смысле. Измерить массу земного шара возможно<sup>16</sup>, а следовательно, возможно определить и его ускорение при заданных условиях. Сделаем это.

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

<sup>16</sup> См. об этом в моей «Занимательной астрономии» статью «Как взвесили Землю».

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

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 расчёта ясно, что за какой-нибудь час или сутки перемещение будет слишком ничтожно. Возьмём крупный интервал – год, т. е. круглым счётом 32 млн секунд ( $32 \times 10^6$ ). Путь  $S$ , проходимый в  $t$  секунд при ускорении  $a$ , равен (см. справочную табличку с. 31).

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

В данном случае

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

Перемещение равно примерно миллионной доле сантиметра. Такого перемещения нельзя усмотреть в самый сильный микроскоп. Возьмём ещё больший промежуток времени: пусть человек напирает на земной шар всю жизнь, скажем, 70 лет. Тогда величина перемещения увеличится в 70 %, т. е. круглым счётом в 5000 раз, и станет равной

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

Это приблизительно толщина человеческого волоса.

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

Самое удивительное то, что расчёт наш ничуть не фантастичен. Мы действительно сдвигаем земной шар силой наших мускулов! Так, например, подпрыгивая, мы надавливаем ногами на Землю и заставляем её подаваться – пусть на ничтожную величину – под действием этой силы. Мы совершаем подобные подвиги на каждом шагу – буквально на каждом шагу, потому что при ходьбе неизбежно отталкиваем ногой нашу планету. Ежесекундно заставляем мы земной шар делать сверхмикроскопические перемещения, прибавляя их к тем астрономическим движениям, которыми он обладает<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Надо, впрочем, иметь в виду, что наши усилия не целиком расходуются на сообщение Земле движения: часть силы тратится на изменение её формы. (Просто стоя на земле, вы давите на неё силой, равной своему весу. Однако в системе Земля+человек эта сила является внутренней, и, как уже отмечал автор книги и про что будет рассказывать в следующей части, она не способна привести к движению всей системы. Да, во время прыжка человек отталкивает от себя Землю, однако сила гравитации притягивает его обратно к Земле (и Землю к нему), и в конечном результате эта сила опять остаётся внутренней. Таким образом, чтобы можно было осуществить движение Земли, описанное автором, надо иметь внешнюю, относительно системы Земля+человек, точку опоры, от которой можно было бы отталкиваться, воздействуя на Землю. – *Ред.*)

## Ложный путь изобретательства

В поисках новых технических возможностей изобретатель должен неизменно держать свою мысль под контролем строгих законов механики, если не хочет вступить на путь бесплодного фантазёрства. 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 какому двигался центр тяжести целой бомбы. В частном случае если центр тяжести тела был первоначально в покое (т. е. если тело было неподвижно), то никакие внутренние силы не могут переместить центр тяжести.

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

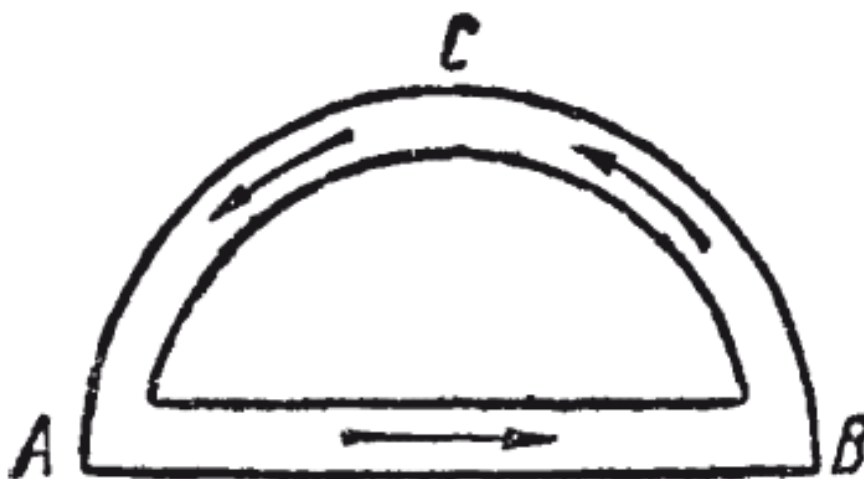


Рис. 12. Проект летательного аппарата нового типа

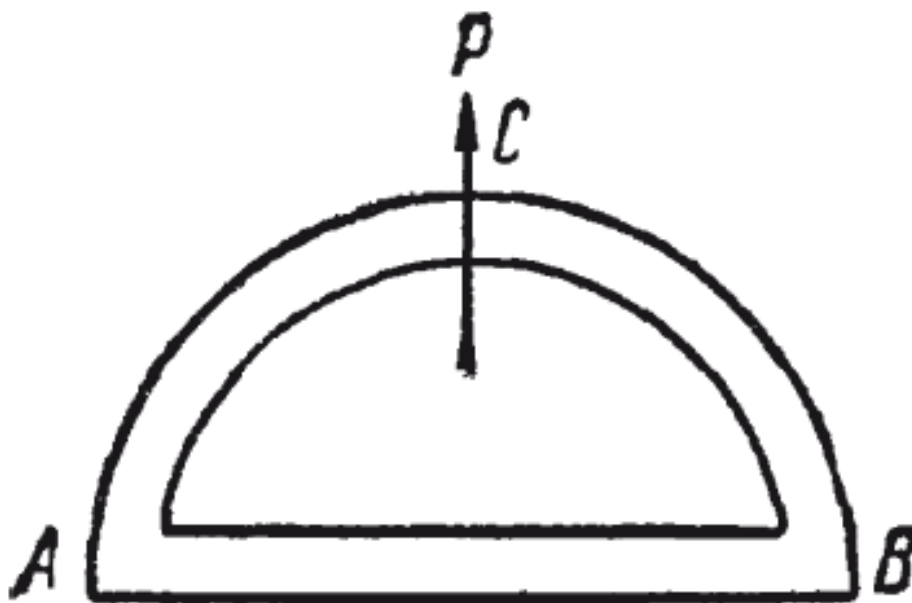


Рис. 13. Сила  $P$  должна увлекать аппарат вверх

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

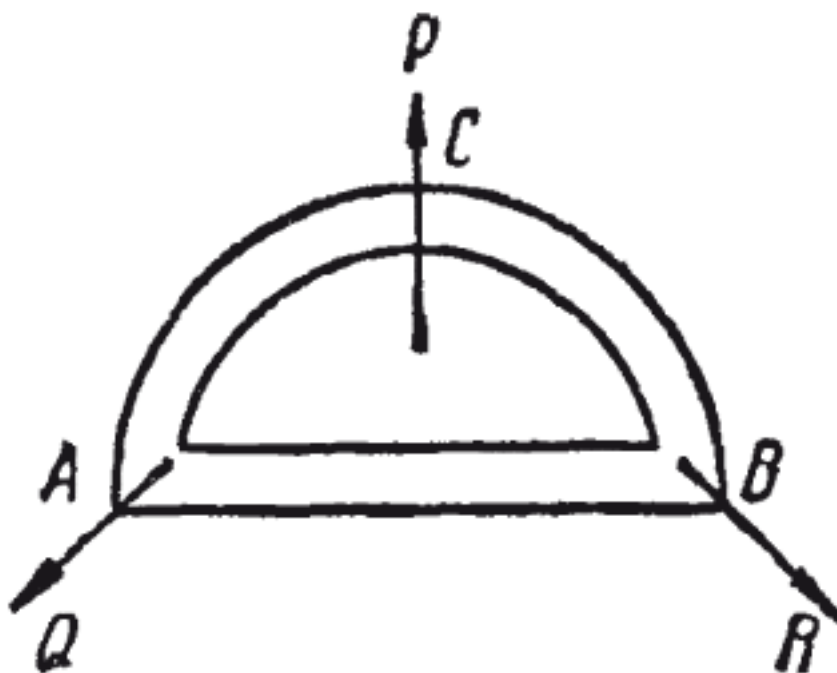


Рис. 14. Почему аппарат не взлетает?

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

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

## Где центр тяжести летящей ракеты?

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

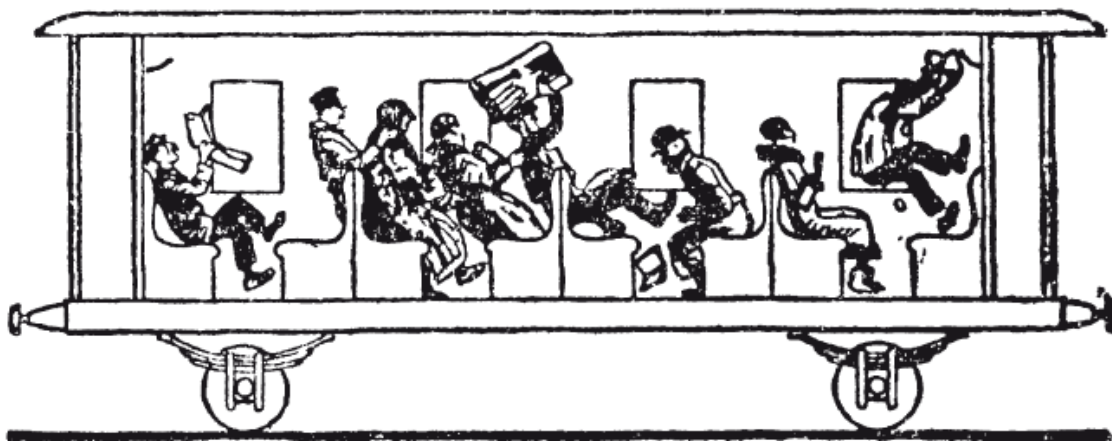
Что можно возразить против такого довода? То, что он основан на недоразумении. Если бы газы, вытекающие из ракеты, не встречали земной поверхности, было бы ясно, что ракета вовсе не уносит с собой на Луну свой центр тяжести. Летит на Луну только *часть* ракеты, остальная же часть – продукты горения –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

Теперь примем во внимание то обстоятельство, что вытекающие газы движутся не беспрепятственно, а ударяются о Землю. Тем самым в систему ракеты включается весь земной шар, и речь должна идти о сохранении центра тяжести огромной системы Земля – ракета. Вследствие удара газовой струи о Землю (или о её атмосферу) наша планета несколько смещается, центр тяжести её отодвигается в сторону, противоположную движению ракеты. Масса земного шара настолько велика по сравнению с массой ракеты, что самого ничтожного, практически неуловимого его перемещения оказывается достаточно для уравновешения того смещения центра тяжести системы Земля – ракета, которое обусловлено перелётом ракеты на расстояние Луны. Передвижение земного шара меньше расстояния до Луны во столько же раз, во сколько раз масса Земли больше массы ракеты (т. е. в сотни триллионов раз!).

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



## Глава 3 Тяжесть



### Свидетельства отвеса и маятника

Отвес и маятник – без сомнения, простейшие (по крайней мере в идее) из всех приборов, какими пользуется наука. Тем удивительнее, что столь примитивными орудиями добыты поистине сказочные достижения: человеку удалось благодаря им проникнуть мысленно в недра Земли, узнать, что делается в десятках километров под нашими ногами. Мы вполне оценим этот подвиг науки, если вспомним, что глубочайшая буровая скважина мира (на момент написания книги. – *Ред.*) не длиннее  $3\frac{1}{4}$  км<sup>18</sup>, т. е. далеко не достигает тех глубин, о которых дают нам показания, находящиеся на поверхности земли отвес и маятник.

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

<sup>18</sup> Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) является самой глубокой в мире. Её глубина – 12 262 м. (*Примеч. ред.*)

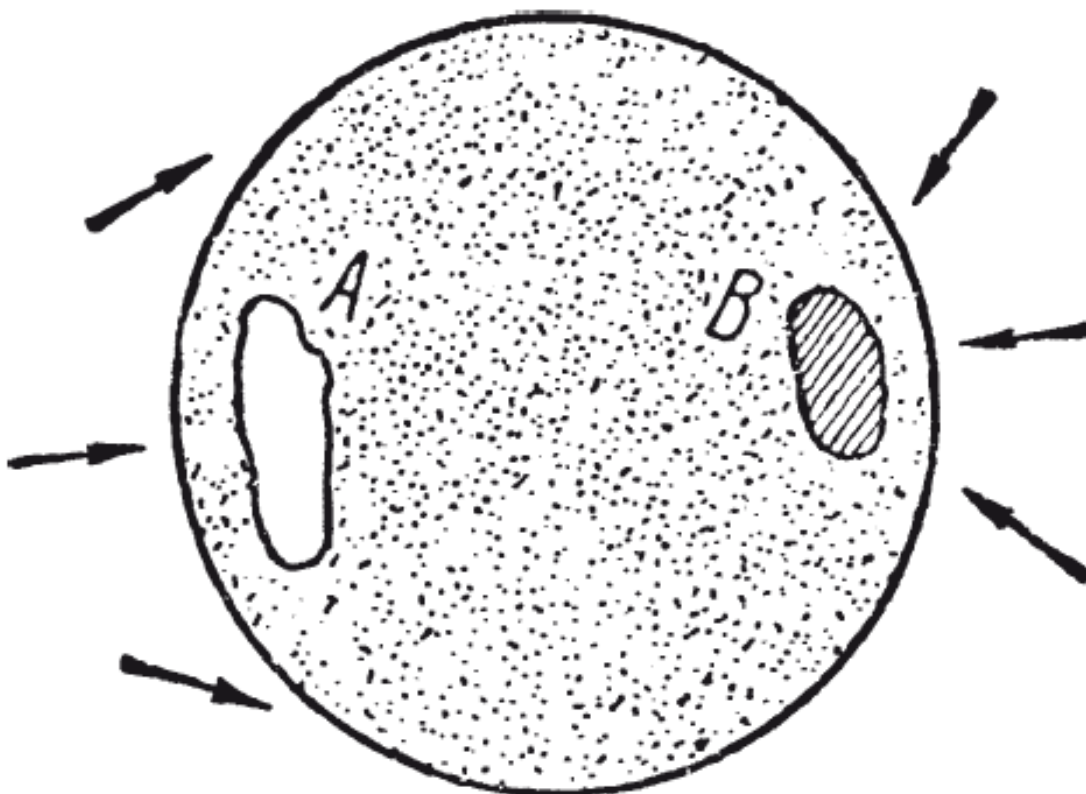


Рис. 15. Пустоты (A) и уплотнения (B) в толще земного шара отклоняют отвес (по А. В. Клоссовскому)

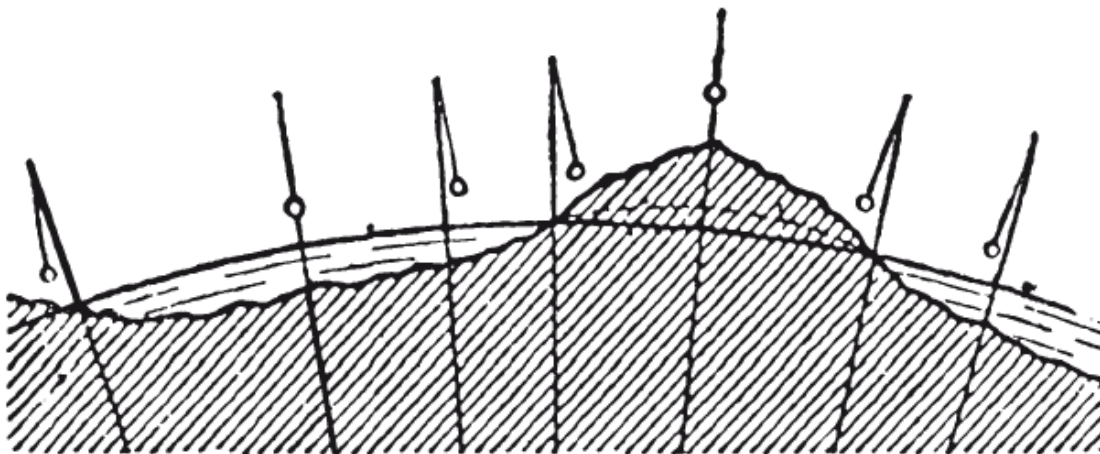


Рис. 16. Профиль земной поверхности и направления отвесов (по А.В. Клоссовскому)

Ещё чувствительнее в этом отношении маятник. Этот прибор обладает следующим свойством: если размах его качаний не превосходит нескольких градусов, то *продолжительность* одного качания не зависит от величины размаха, и большие и малые качания длятся одинаково. Продолжительность качания зависит совсем от других обстоятельств: от *длины* маятника и от *ускорения силы тяжести* в этом месте земного шара. Формула, связывающая продолжительность  $t$  одного полного (туда и назад) качания с длиной  $l$  маятника и с ускорением  $g$  силы тяжести, такова:

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

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

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

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

Ясно, что всякое изменение силы тяжести должно отразиться на длине такого маятника: его придётся либо удлинить, либо укоротить, чтобы он в точности отбивал секунды. Таким путём удаётся улавливать изменения силы тяжести в 0,0001 её величины.

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

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

Незаменимые услуги оказал подобный способ исследования при выявлении причин так называемой Курской магнитной аномалии (отклонение от нормы). Приведу несколько строк отчёта одного из её исследователей<sup>19</sup>: «... Можно с полной определённостью утверждать о наличии под земной поверхностью значительных притягивающих масс, причём граница этих масс с западной стороны... устанавливается с совершенной отчётливостью. Вместе с тем представ-

<sup>19</sup> Исследования в районе Курской аномалии производились не с отвесом, а с особыми крутильными весами (так называемым вариометром). Нить прибора закручивается под действием притяжения подземных масс. Точность показаний этого удивительного прибора равна одной миллиардной ( $10^{-12}$ ) доле грамма! Притяжение больших гор вариометр «чувствует» на расстоянии 300 км. Вот краткое описание прибора (из статьи проф. П.М. Никифорова о Курской аномалии): «Главную часть прибора составляют крутильные весы, изображённые схематически на рис. 17. Коромысло  $M_1E$  из тонкой алюминиевой трубки имеет длину около 40 см: к одному концу коромысла прикреплён золотой груз  $M_1$  цилиндрической формы (30 г), к другому подвешивается на проволоке  $EM_2$  золотой подвесок (30 г). Коромысло подвешено на весьма тонкой платиново-иридиевой нити  $AO$  длиной 60–70 см. Для защиты от конвекционных токов воздуха крутильные весы окружаются оболочкой с тройными металлическими стенками. В приборе имеются две пары крутильных весов, повернутых на  $180^\circ$  относительно друг друга».  $S$  – плоское зеркало.

ляется вероятным, что эти массы простираются преимущественно в восточном направлении, имея восточный скат более пологим, чем западный».



Рис. 17. Вверху справа – вариометр. Вверху слева – схема устройства прибора

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

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

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

Третий максимум к востоку от Мишкино вновь даст указание о приближении древних пород к земной поверхности. оболочкой с тройными металлическими стенками. В приборе имеются две пары крутильных весов, повёрнутых на  $180^\circ$  относительно друг друга». У – плоское зеркало.

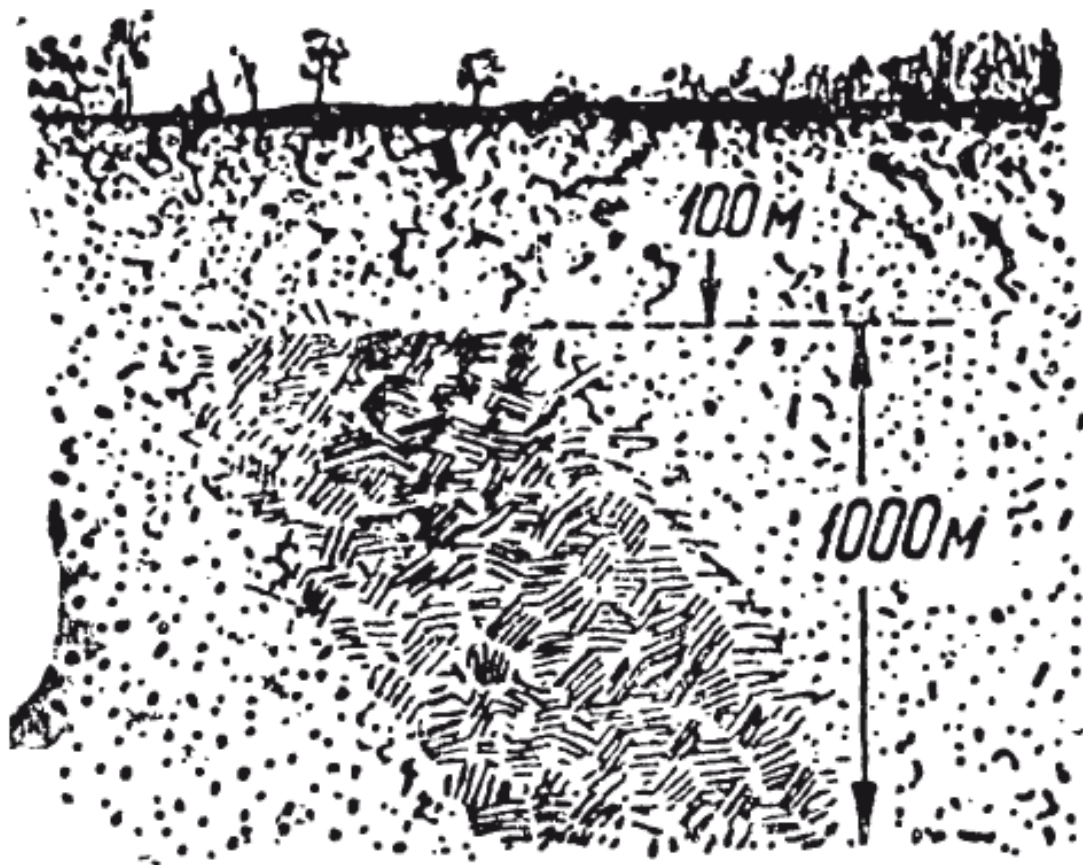


Рис. 18. Причина Курской аномалии: шток железной руды мощностью около 1000 м на глубине 100 м

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

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

## Маятник в воде

### Задача

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

### Решение

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

Это загадочное на первый взгляд явление объясняется выталкивающим действием воды на погружённые в неё тела. Оно как бы уменьшает вес маятника, не изменяя его массы. Значит, маятник в воде находится совершенно в таких же условиях, как если бы он был перенесён на другую планету, где ускорение силы тяжести слабее. Из формулы, приведённой в предыду-

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

щей статье, следует, что с уменьшением ускорения силы тяжести ( $g$ ) время колебания ( $t$ ) должно возрасти: маятник будет колебаться медленнее.

## На наклонной плоскости

### Задача

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

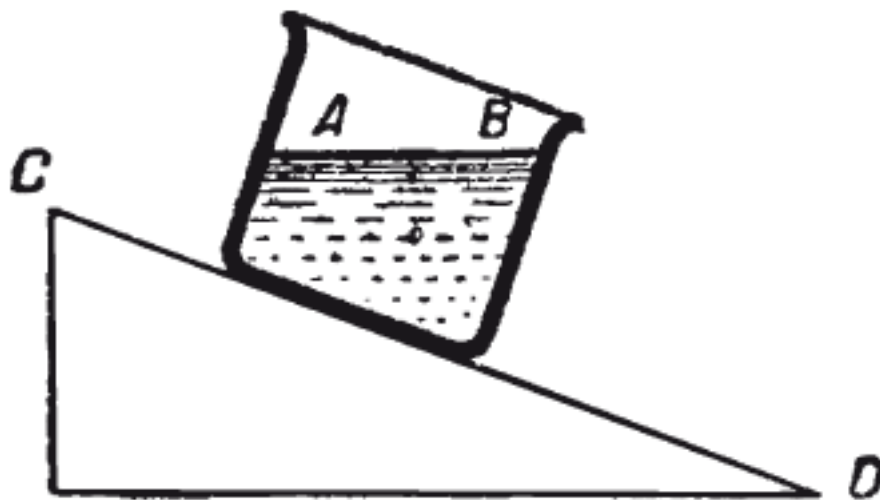


Рис. 19. Сосуд с водой скользит под уклон. Как расположится уровень воды?

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

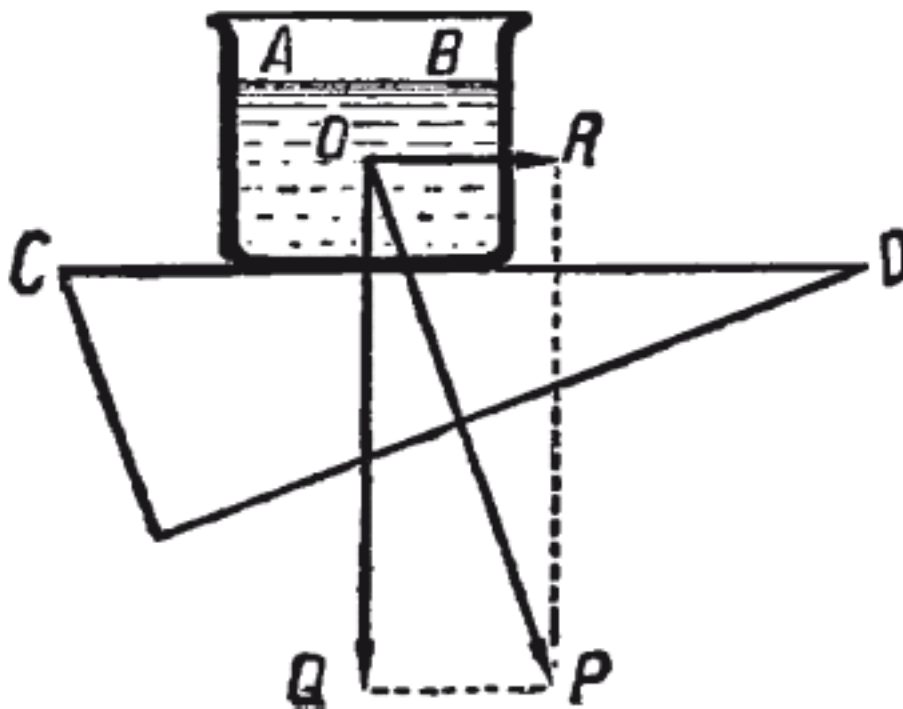


Рис. 20. Решение задачи рис. 19

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

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

Но следует ли это также из приведённого ранее объяснения? Конечно. Ведь в случае *равномерного* движения сосуда по наклонной плоскости частицы стенок сосуда не получают никакого ускорения; частицы же жидкости в сосуде, находясь под действием силы  $R$ , будут силой  $R$  придавливаться к передней стенке сосуда. Следовательно, каждая частица воды будет находиться под действием двух придавливающих сил  $R$  и  $Q$ , равнодействующая которых и есть вес  $P$  частицы, направленный вертикально. Вот почему уровень воды должен в этом случае установиться горизонтально. Только в самом начале движения, когда сосуд, до получения постоянной скорости, ещё движется *ускоренно*<sup>20</sup>, уровень воды принимает на мгновение наклонное положение.

<sup>20</sup> Надо помнить, что тело не может прийти в равномерное движение мгновенно: переходя от покоя к равномерному движению, оно не может миновать состояния *ускоренного* движения, состояния хотя бы весьма кратковременного.

## Когда горизонтальная линия не горизонтальна?

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

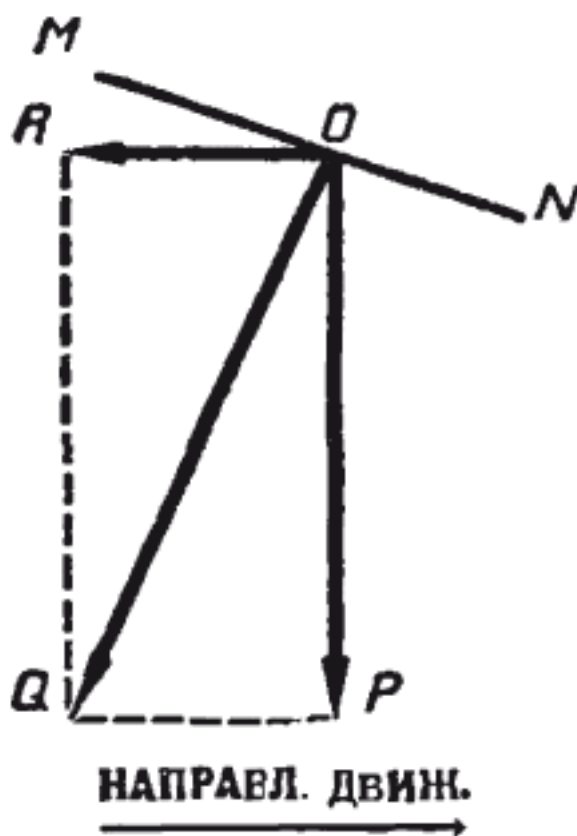


Рис. 21. Какие силы действуют на предметы в вагоне трогającego поезда?

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

Крестьянам показалось,  
Как вышли на пригорочек,  
Что всё село шатается,  
Что даже церковь старую

С высокой колокольнею  
Шатнуло раз-другой...<sup>21</sup>

Горизонтальный пол может утратить для вас своё 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 неё – вообще в таких частях пути, где вагон идёт *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 идём вниз, когда шагаем вдоль вагона в направлении движения, и всходим вверх, когда идём в обратном направлении. А при отправлении поезда со станции пол как бы наклоняется в сторону, противоположную движению».

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

Разберёмся в причине этих любопытных явлений, причём будем рассматривать их не с точки зрения покоящегося наблюдателя, находящегося вне вагона, а с точки зрения такого наблюдателя, который, помещаясь внутри вагона, сам участвует в ускоренном движении и, следовательно, относит все наблюдаемые явления к себе, словно считая себя неподвижным. Когда вагон движется ускоренно, а мы считаем себя покоящимися, то напор задней стенки вагона на наше тело (или увлекающее действие сидения) воспринимается нами так, словно мы сами намираем на стенку (или увлекаем сиденье) с равной силой.

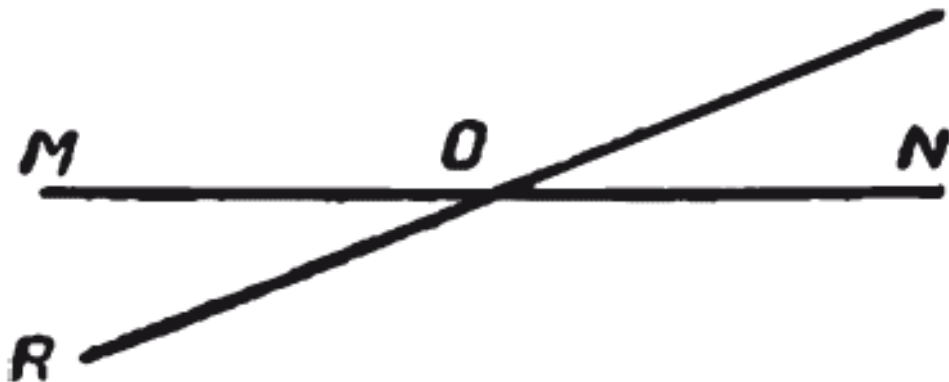


Рис. 22. Почему пол трогаящегося вагона кажется наклонным?

Мы подвержены тогда действию двух сил: силы  $R$ , направленной *обратно движению вагона*, и силы веса  $P$ , *прижимающей нас к полу*. Равнодействующая  $Q$  изобразит то направление, которое мы в таком состоянии будем считать отвесным. Направление  $MN$ , перпендикулярное к новому отвесу, станет для нас горизонтальным. Следовательно, прежнее горизонтальное

<sup>21</sup> Н.А. Некрасов. «Кому на Руси жить хорошо», гл. II «Сельская ярмонка». (Примеч. ред.)

направление  $OR$  будет казаться поднимающимся в сторону движения поезда и имеющим уклон в обратном направлении (рис. 22).

Что произойдёт при таких условиях с жидкостью в тарелке? Для этого представим себе, что новое «горизонтальное» направление не совпадает с уровнем жидкости, а следует 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 жёлоба).

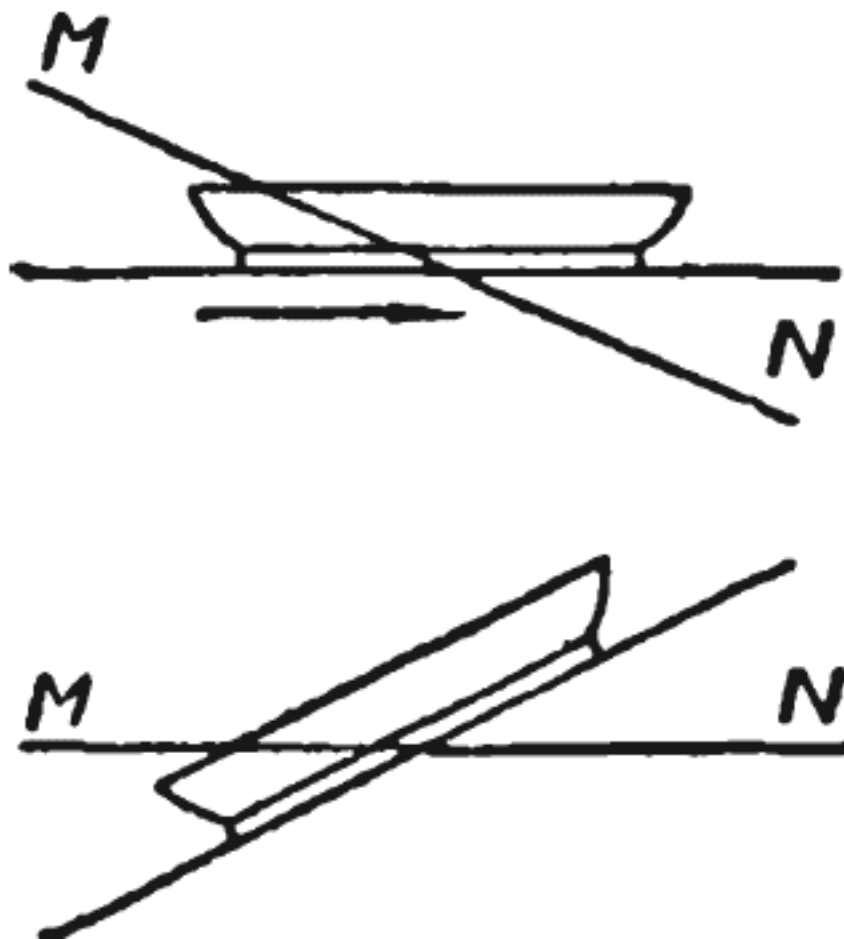


Рис. 23. Почему в трогаящемся вагоне жидкость переливается через задний край блюда?

Картину всех явлений, происходящих в вагоне в момент отправления поезда, легко представить себе, если вообразить, что вагон наклонился соответственно новому положению «горизонтальной» линии (см. заставку к этой главе). Вы поймёте, 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 ещё находятся в покое.

Сходного объяснения придерживался и Галилей, как видно из следующего отрывка: «Пусть сосуд с водой имеет поступательное, но неравномерное движение, меняющее скорость на то ускоренное, то замедленное. Вот какие будут последствия неравномерности. Вода не вынуждена разделять движения сосуда. При уменьшении скорости сосуда она сохраняет приобретённое стремление и притечёт к переднему концу, где и образуется поднятие. Если, напротив того, скорость сосуда увеличивается, вода сохранит более медленное движение, отстанет и при заднем конце заметно поднимется».

Такое объяснение в общем не хуже согласуется с фактами, чем приведённое ранее. Для науки представляет ценность то объяснение, которое не только согласуется с фактами, но и даёт возможность учитывать их *количественно*. В данном случае мы поэтому должны предпочесть объяснение, которое было изложено раньше – именно, что пол под ногами перестаёт быть горизонтальным. Оно даёт возможность учесть явление количественно, чего нельзя сделать, придерживаясь обычной точки зрения. Если, например, ускорение поезда при отходе со станции равно  $1 \text{ м/с}^2$ , то угол  $QOP$  (рис. 21, с. 59) между новым и старым отвесным направлением легко вычислить из треугольника  $QOP$ , где  $QP:OP = 1:9,8 = \text{около } 0,1$ ;

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

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

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

## Магнитная гора

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



Рис. 24. Мнимая магнитная гора в Калифорнии

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

Нашлись, однако, люди, которым показалось сомнительным, чтобы гора могла притягивать автомобили. Для проверки произвели нивелировку участка дороги под горой. Результат получился неожиданный: то, что все принимали за подъём, оказалось *спуском* с уклоном в  $2^\circ$ . Такой уклон может заставить автомобиль катиться без мотора на очень хорошем шоссе.

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

## Реки, текущие в гору

Сходной иллюзией зрения объясняются и рассказы путешественников о реках, вода которых течёт вверх по уклону. Привожу выписку об этом из книги немецкого физиолога проф. Бернштейна «Внешние чувства»: «Во многих случаях мы склонны ошибаться при суждении о том, горизонтально ли данное направление, наклонено ли оно вверх или вниз. Идя, например, по слабо наклонённой дороге и видя в некотором расстоянии другую дорогу, встречающуюся с первой, мы представляем себе подъём второй дороги более крутым, чем на самом деле. С удивлением убеждаемся мы затем, что вторая дорога вовсе не так крута, как мы ожидали».

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.