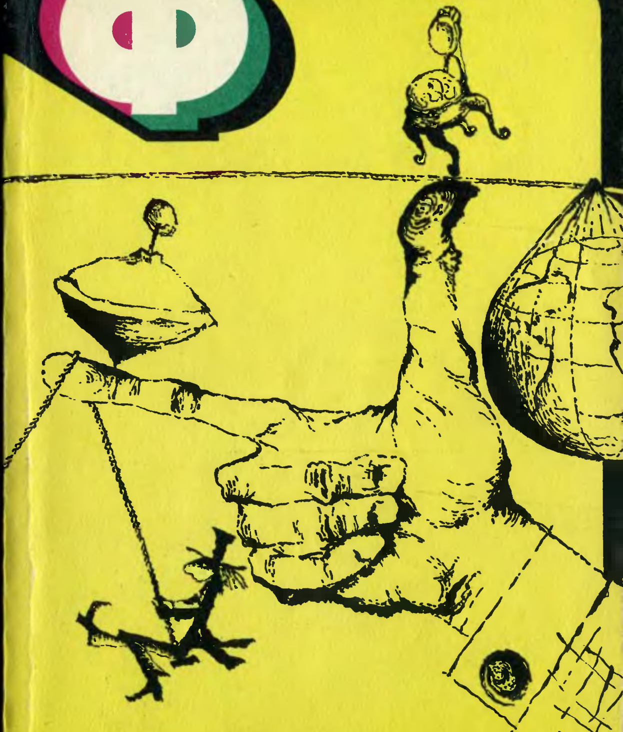
ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ



Л.Д. Ландау
А.И. Китайгородский

ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕЛА

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

книга 1

Л.Д. Ландау

А.И. Китайгородский

ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Издание четвертое, исправленное
и дополненное

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва 1978

530.1
Л 22
УДК 530.1

АННОТАЦИЯ

Переиздание первой части книги Ландау Л. Д. и Китайгородского А. И. «Физика для всех» (Движение, теплота). Цель книги дать читателю в общедоступной форме отчетливое представление об основных идеях и новейших достижениях современной физики. Движение тел рассмотрено с двух точек зрения — наблюдателя в инерциальной и неинерциальной системах координат. Весьма детально изложены закон всемирного тяготения и его применение для расчетов космических скоростей, для интерпретации лунных приливов, для геофизических явлений.

Книга рассчитана на самый широкий круг читателей — от впервые знакомящихся с физикой до лиц с высшим образованием, проявляющих интерес к данной науке. Книга явится прекрасным пособием для учителей и поможет им оживить преподавание физики в школе.

Л $\frac{20401-015}{053(02)-78}$ 127-78

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

После многих лет я решил возвратиться к неоконченной книге «Физика для всех», написанной мною с Дау,— так называли друзья замечательного ученого и обаятельного человека академика Л. Д. Ландау.

Эта книга была уж очень «совместной». Очень долго мне было трудно взяться за ее продолжение. Многие читатели упрекали меня в этом в своих письмах.

И вот теперь на их суд выносится новое издание «Физики для всех», которое разбито на четыре небольших книги. Я дал им названия: «Физические тела», «Молекулы», «Электроны» и «Фотоны и ядра». Разбиение произведено, так сказать, по глубине проникновения в строение вещества. Эти четыре книги охватывают все основные законы физики. Возможно, что есть смысл продолжить «Физику для всех», посвятив следующие ее выпуски фундаменту разных областей естествознания и техники.

Две первые книги представляют собой лишь незначительно переработанную, но кое-где существенно дополненную прежнюю книгу. Последние две книги написаны мною.

Я прекрасно сознаю, что внимательный читатель почувствует различие между ними. Однако общие принципы изложения материала, которых мы придерживались с Дау, сохранены. Это дедуктивность изложения, следование логике предмета, а не истории его развития. Мы полагали полезным беседовать с читателем простым, житейским языком, не бояться юмора. И еще одно: мы не жалели читателя. Если хочешь понять книгу, то многие страницы надо прочесть не раз и не два и как следует задуматься над прочитанным.

Что же касается отличия новых книг от старой, то оно заключается в следующем. Когда писалась прежняя книга, то авторы подходили к ней, как к «первой» книге по физике, и даже полагали, что она может конкурировать со школьным учебником. Но читательские отклики и опыт преподавателей физики показали, что дело обстоит не так. Круг читателей составили учителя, инженеры, школьники, которые желали сделать физику своей профессией. Оказалось, что никто не рассматривает «Физику для всех» как книгу учебную. К ней относятся, как к книге научно-популярной, расширяющей школьные знания, останавливающей зачастую внимание на том, что по тем или иным причинам не включается в программы.

Естественно, полагая, что мой читатель более или менее знаком с физикой, я почувствовал себя более свободным в выборе тем и счел возможным прибегнуть к более разговорному стилю.

Текст первой книги подвергся минимальным изменениям. Это в основном первая половина «Физики для всех» Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского.

Поскольку разговор о физике начинается с тех явлений, которые не требуют знания строения вещества, естественно назвать первую книгу «Физические тела». Конечно, можно было бы озаглавить эти страницы, как это обычно принято, словом «механика», то есть наука о движении. Но ведь учение о теплоте, о котором пойдет речь в следующей книге, также есть наука о движении..., но только не видимых глазу тел — молекул и атомов. Так что выбранное название представляется мне более удачным.

Первая книга в основном посвящена учению о законах движения и гравитационного тяготения, которые навечно останутся фундаментом физики, а значит, и всего естествознания.

Сентябрь 1977 *А. И. Китайгородский*

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

О САНТИМЕТРЕ И СЕКУНДЕ

Всем приходится измерять длину, отсчитывать время и взвешивать разные тела. Поэтому все хорошо знают, что такое сантиметр, секунда и грамм. Но для физика эти измерения особенно важны — они необходимы для суждения о большинстве физических явлений. Расстояние, промежутки времени и масса, называемые основными понятиями в физике, люди стремятся измерять как можно точнее.

Современные физические приборы позволяют определить различие в длине двух метровых стержней, даже если оно меньше одной миллиардной доли метра. Можно отличить промежутки времени, различающиеся на одну миллионную долю секунды. Хорошие весы с очень большой точностью установят массу макового зернышка.

Техника измерений начала развиваться всего несколько сот лет назад, и относительно совсем недавно условились о том, отрезок какой длины и массу какого тела принять за единицу.

Почему же сантиметр и секунда были выбраны такими, какими мы их знаем? Ведь ясно, что особого значения не имеет, будет ли сантиметр или секунда длиннее.

Единица измерения должна быть удобной — больше никаких требований мы к ней не предъявляем. Очень хорошо, если единица измерений есть под руками. А проще всего взять за единицу измерения саму руку. Именно таким способом и поступали в древние времена; об этом свидетельствуют сами названия единиц, например «локоть» — расстояние от локтя до кончиков пальцев вытянутой руки, дюйм — ширина большого пальца у его основания. Для измерения использовали и ногу — отсюда название длины «фут» — длина ступни (по английски foot — ступня).

Хотя эти единицы измерения весьма удобны тем, что они всегда при себе, но недостатки их очевидны: слишком уж отличаются друг от друга люди, чтобы рука или нога могли служить не вызывающей споров единицей измерения.

С развитием торговли возникла необходимость договориться о единицах измерения. Сначала внутри отдельного рынка, затем для города, потом для всей страны и, наконец, для всего мира устанавливаются эталоны длины и массы. Эталон — это образцовая мера: линейка, гиря. Государство тщательно хранит эталоны, и другие линейки и гири должны изготавливаться в точном соответствии с эталонами.

В царской России основные меры веса и длины — они назывались фунт и аршин — были впервые изготовлены в 1747 г. В XIX в. требования к точности измерений возросли, и эти эталоны оказались несовершенными. Сложная и ответственная работа по созданию точных эталонов была выполнена в 1893—1898 гг. под руководством Дмитрия Ивановича Менделеева. Великий химик придавал большое значение установлению точных мер. По его почину в конце XIX в. была создана Главная палата мер и весов, где хранились эталоны и изготовлялись их копии.

Одни расстояния выражают в больших единицах, другие — в более мелких. В самом деле, не станем же мы выражать расстояние от Москвы до Ленинграда в сантиметрах и массу железнодорожного состава — в граммах. Поэтому люди условились об определенном соотношении крупных и мелких единиц. Как всем известно, в той системе единиц, которой мы пользуемся, крупные единицы отличаются от мелких в 10, 100, 1000 и вообще в любую степень от десяти раз. Такое условие очень удобно и упрощает все вычисления. Однако такая удобная система принята не во всех странах. В Англии и США до сих пор редко пользуются метром, сантиметром и километром, а также граммом и килограммом *), несмотря на очевидность удобств метрической системы.

---

*) В Англии официально приняты следующие меры длины: морская миля (равна 1852 м), простая миля (1609 м), фут (30,5 см); фут равен 12 дюймам, дюйм — 2,54 см; ярд — 0,91 м. Это «порт-

В XVII столетии возникла мысль выбрать такой эталон, который существует в природе и не изменяется с годами и веками. В 1664 г. Христиан Гюйгенс предложил за единицу длины принять длину маятника, совершающего одно колебание в секунду. Примерно через сто лет, в 1771 г., было предложено считать эталоном длину пути, который проходит в секунду свободно падающее тело. Однако оба варианта оказались неудобными и не были приняты. Понадобилась революция для того, чтобы появились современные меры,— килограмм и метр, рожденные Великой французской революцией.

В 1790 г. Учредительное собрание создало для выработки единых мер специальную комиссию, в которую входили лучшие физики и математики. Из всех предложенных вариантов единицы длины комиссия выбрала одну десятимиллионную долю четверти земного меридиана и дала этой единице название «метр». В 1799 г. был изготовлен эталон метра и отдан на хранение в архив Республики.

Вскоре, однако, стало ясно, что отвлеченно правильная мысль о целесообразности выбора образцовых мер, заимствованных из природы, не осуществима в полной мере. Более точные измерения, проведенные в XIX веке, показали, что изготовленный эталон метра приблизительно на 0,08 миллиметра короче одной сорокамиллионной части земного меридиана. Стало очевидно, что по мере развития измерительной техники будут вноситься новые поправки. Сохраняя определение метра как части земного меридиана, пришлось бы после каждого нового измерения меридиана изготовлять новые эталоны и пересчитывать заново все длины. Поэтому после обсуждения на международных съездах в 1870, 1872 и 1875 гг. было решено считать единицей длины не одну сорокамиллионную часть меридиана, а эталон метра, изготовленный в 1799 г. и хранящийся теперь в Международном бюро мер и весов в Севре.

новская» мера, в ярдах принято отмеривать нужное на костюм количество ткани.

Масса в англосаксонских странах измеряется в фунтах (равен 454 г). Небольшие доли фунта — унция (1/16 фунта) и гран 1/7000 фунта); этими мерами пользуются аптекари при развешивании лекарств.

Вместе с метром возникли и его доли: одна тысячная, называемая миллиметром, одна миллионная, называемая микроном, и наиболее часто употребляемая, одна сотая — сантиметр.

Теперь скажем несколько слов о секунде. Она много старше сантиметра. При установлении единицы измерения времени не было никаких разногласий. Это и понятно: смена дня и ночи, вечный круговорот Солнца подсказывают естественный способ выбора единицы времени. Каждому хорошо известно выражение: «определить время по Солнцу». Высоко стоит Солнце в небе, значит — полдень, и нетрудно, измеряя длину тени, отбрасываемой шестом, установить то мгновение, когда оно находится в самой высокой точке. На следующий день тем же способом можно отметить то же мгновение. Истекший промежуток времени составляет сутки. А дальше остается лишь поделить сутки на часы, минуты и секунды.

Большие единицы измерения — год и сутки — дала нам сама природа. Но час, минута и секунда придуманы человеком.

Современное деление суток восходит к глубокой древности. В Вавилоне была распространена не десятичная, а шестидесятиричная система счисления. Шестьдесят делится на 12 без остатка, отсюда у вавилонян деление суток на 12 равных частей.

В Древнем Египте было введено деление суток на 24 часа. Позднее появились минуты и секунды. То, что в часе 60 минут, а в минуте 60 секунд — также наследие шестидесятиричной системы Вавилона.

В древние и средние века время измеряли при помощи солнечных часов, водяных часов (по времени вытекания воды из больших сосудов) и ряда других хитроумных, но весьма неточных приспособлений.

При помощи современных часов легко убедиться, что сутки в разное время года не совсем одинаковы. Поэтому условились принять за единицу измерения времени средние за год солнечные сутки. Одна двадцать четвертая часть этого среднего за год промежутка времени и называется часом.

Но, устанавливая единицы времени — час, минуту, секунду — делением суток на равные доли, мы предполагаем, что Земля вращается равномерно. Однако океанские лунно-солнечные приливы, хотя и в ничтожной степени, замедляют вращение Земли. Значит, наша единица времени — сутки — непрестанно удлиняется.

Это замедление вращения Земли так незначительно, что его удалось непосредственно измерить лишь недавно, с изобретением атомных часов, измеряющих промежутки времени с огромной точностью — до миллионной доли секунды. Изменение суток достигает 1—2 миллисекунд за 100 лет.

Но эталон, если это возможно, должен исключить даже такую незначительную ошибку. Мы рассказали на стр. 16, как это теперь принято делать.

ВЕС И МАССА

Вес — это сила, с которой тело притягивается Землей. Эту силу можно измерить пружинными весами. Чем больше весит тело, тем больше растягивается пружина, на которой оно подвешено. При помощи гири, принятой за единицу, пружину можно проградуировать — сделать отметки, которые укажут, насколько пружина растянулась под действием гири в один килограмм, два, три и т. д. Если после этого на такие весы подвесить тело, то по растяжению пружины удастся найти силу притяжения его Землей. (рис. 1.1, *а*). Для измерения веса используют не только растягивающуюся, но и сжимающуюся пружину (рис. 1.1, *б*). Используя пружины разной толщины, можно изготовить весы для измерения и очень больших и очень малых

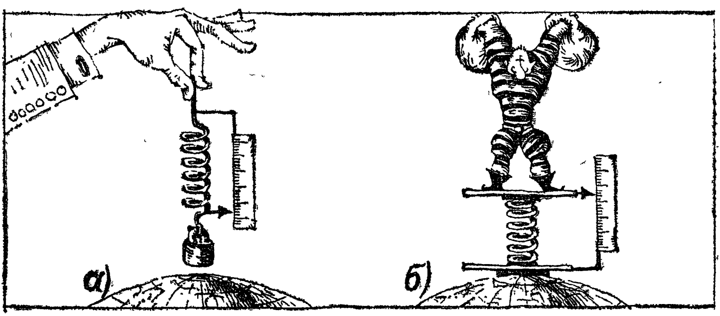


Рис. 1.1.

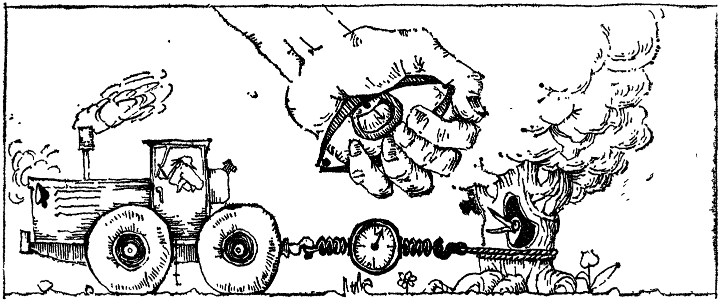


Рис. 1.2.

тяжестей. На этом принципе основано устройство не только грубых торговых весов, но и очень точных приборов, применяющихся для физических измерений.

Проградуированная пружина служит для измерения не только силы земного притяжения, т. е. веса, но и других сил. Такой прибор называется динамометр, что значит измеритель сил. Многие видели, как динамометр используется для измерения мускульной силы человека. Силу тяги мотора также удобно измерять растягивающейся пружиной (рис. 1.2).

Вес тела — очень важное его свойство. Однако вес зависит не только от самого тела. Ведь его притягивает Земля. А если бы мы были на Луне? Очевидно, вес был бы другой — примерно в 6 раз меньше, как показывают расчеты. Да и на Земле вес различен на разных земных широтах. На полюсе, например, тело весит на 0,5% больше, чем на экваторе.

Однако при всей своей изменчивости вес обладает замечательной особенностью — отношение весов двух тел в одной и той же точке Земли в любых условиях, как показывает опыт, остается неизменным. Если два разных груза на полюсе растягивают пружину одинаково, то эта одинаковость в точности сохраняется и на экваторе.

При измерении веса путем сравнения его с весом эталона находим новое свойство тел, которое называется массой.

Физический смысл этого нового понятия — массы — теснейшим образом связан с той одинаковостью при сравнении веса, которую мы только что отметили.

В отличие от веса масса является неизменным свойством тела, не зависящим ни от чего, кроме как от этого тела.

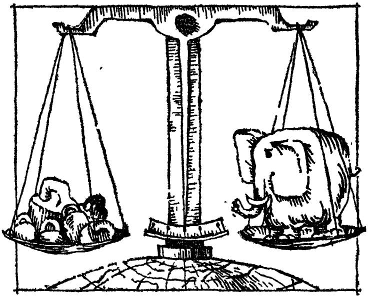


Рис. 1.3.

Сравнение весов, т. е. измерение массы, удобнее всего производить при помощи обычных рычажных весов (рис. 1.3). Мы говорим, что массы двух тел равны, если рычажные весы, на обе чашки которых положены эти тела, строго уравновешены. Если груз взвешен на рычажных весах на экваторе, а затем груз и гири перенесены на полюс, то и груз и гири изменяют свой вес одинаково. Взвешивание на полюсе даст поэтому тот же результат: весы останутся уравновешенными.

Мы можем отправиться за проверкой этого положения и на Луну. Так как и там отношение весов тел не изменяется, то груз, положенный на рычажные весы, уравновесится теми же гирями. Масса тела одна и та же, где бы это тело ни находилось.

Единицы и массы и ве́са связаны с выбором эталонной гири. Точно так же, как в истории с метром и секундой, люди пытались найти естественный эталон массы. Та же комиссия изготовила из определенного сплава гирю, которая на рычажных весах уравновешивала один кубический дециметр воды при четырех градусах Цельсия *). Этот эталон и получил название килограмма.

Позднее, однако, выяснилось, что «взять» один кубический дециметр воды не так-то просто. Во-первых, дециметр, как доля метра, изменялся вместе с уточнением эталона метра. Во-вторых, какой должна быть

---

*) Эта температура выбрана не случайно. Дело в том, что объем воды изменяется с нагреванием очень своеобразно, не так, как у большинства тел. Обычно при нагревании тела расширяются, а вода при повышении температуры от 0 до 4°C сжимается и только перевалив за 4°C начинает расширяться. Таким образом, 4°C — это температура, при которой вода перестает сжиматься и начинает расширяться.

вода? Химически чистой? Дважды дистиллированной? Без следов воздуха? А как быть с примесями «тяжелой воды»? И в довершение всех бед точность измерения объема заметно меньше точности взвешивания.

Пришлось опять отказаться от естественной единицы и принять за меру массы массу специально изготовленной гири. Эта гиря также хранится в Париже вместе с эталоном метра.

Для измерения массы широко применяются тысячные и миллионные доли килограмма — грамм и миллиграмм. X и XI Генеральные конференции по мерам и весам разработали, а затем большинство стран утвердило в качестве государственных стандартов новую, интернациональную систему единиц СИ. В новой системе название килограмм (кг) сохранилось за массой. Всякая сила, в том числе, конечно, и вес, в новой системе измеряется в ньютонах (Н). Почему эта единица так названа и каково ее определение, мы узнаем несколько позже.

Новая система безусловно не сразу и не везде найдет себе применение, а поэтому нам пока полезно запомнить, что килограмм массы (кг) и килограмм силы (кгс) — это единицы разных физических величин, и производить с ними арифметические действия нельзя. Написать 5 кг+2 кгс так же бессмысленно, как складывать метры с секундами.

О СИСТЕМЕ СИ И ОБ ЭТАЛОНАХ

Если эта книга является вашей первой книгой по физике, то тогда отложите, пожалуйста, чтение этого параграфа. Начали мы по старинке — с самого простого. Действительно, уж что может быть проще измерений расстояний, промежутков времени и массы. Просто? Раньше действительно было просто, но не теперь. В настоящее время техника измерений длины, времени, массы требует знаний всей физики, и явления, о которых мы сейчас будем говорить более или менее детально, разобраны лишь в четвертой части нашего сочинения.

Система СИ (система интернациональная) была принята в 1960 г. Медленно, очень медленно, но тем не менее — верно, она завоевывает свое признание. И сейчас, когда пишутся эти строки (в преддверии нового 1977 г.), все же чаще пользуются старыми «проверенными» единицами. Если вы спросите у водителя автомашины, какой мощности у нее мотор, то он, как и раньше, ответит — 100 лошадиных сил, вместо того, чтобы сказать 74 киловатта.

Вероятно, должна смениться пара поколений, исчезнуть с книжного рынка книги, авторы которых не хотели признать СИ, и только тогда эта система решительно вытеснит все остальные.

Система СИ базируется на семи единицах: метре, килограмме, секунде, моле, ампере, кельвине и канделе.

Сейчас я хочу поговорить о первых четырех единицах, имея целью не сообщение читателю деталей измерений соответствующих физических величин, а указание на знаменательную общую тенденцию. Она состоит в том, чтобы отказаться от материальных эталонов, а на их место ввести природные константы, значения которых не должны зависеть от экспериментальных устройств и которые (по крайней мере с точки зрения современной физики) не должны меняться со временем.

Начнем с определения метра. В спектре изотопа 86 атомов криптона имеется сильная спектральная линия. Методами, о которых рассказано далее, каждая спектральная линия характеризуется исходным и конечным энергетическими уровнями. Речь идет о переходе с уровня $5d_5$ на уровень $2p_{10}$. Метр равен длине 1 650 763,73 волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86. Эту длину волны света можно измерить с точностью не большей, чем $\pm 4 \cdot 10^{-9}$. Поэтому добавлять еще одну значащую цифру к написанному выше девятизначному числу не имеет смысла.

Мы видим, что данное определение никак не связывает нас с материальным эталоном. Нет также основания ожидать, что длина волны светового характеристического излучения меняется с веками. Так что цель достигнута.

Все это хорошо, скажет читатель. А как прокалибровать с помощью такого невещественного эталона обычную вещественную линейку? Физика умеет это делать с помощью техники интерференционных измерений, о которой рассказано в книге 4.

Имеются все основания полагать, что это определение потерпит в ближайшее время изменение. Дело в том, что с помощью лазера (например гелий-неонового лазера, стабилизированного парами йода) можно добиться измерения длины волны с точностью 10^{-11}—10^{-12}. Не исключено, что окажется целесообразным выбрать в качестве невещественного эталона другую спектральную линию.

Совершенно аналогичным образом определяется секунда. Используется переход между двумя близкими энергетическими уровнями атома цезия. Величина, обратная частоте этого перехода, дает время, затраченное на совершение одного колебания. Одна секунда принимается равной 9 192 631 770 периодам этих колебаний. Поскольку колебания лежат в микроволновой области, то, используя прием деления частоты, можно радиотехническими устройствами прокалибровать любые часы. Этот способ измерения дает ошибку в одну секунду по прошествии 300 000 лет.

Метрологи ставят перед собой цель — сделать так, чтобы один и тот же энергетический переход можно было бы использовать как для определения единицы длины (выраженной в числе длин волн), так и единицы времени (выраженной в числах периодов колебаний).

В 1973 г. было показано, что эта задача решается. Точные измерения были проведены с помощью гелий-неонового лазера, стабилизированного метаном. Длина волны равнялась 3,39 миллимикрон, а частота $88 \cdot 10^{-12}$ секунд в минус первой степени. Измерения были проведены настолько точно, что перемножив эти два числа, получили для скорости света в пустоте величину 299 792 458 метров в секунду с точностью в 4 миллиардных доли.

На фоне этих блестящих достижений и еще более далеко идущих перспектив точность измерения массы оставляет желать лучшего. Вещественный килограмм продолжает, к сожалению, жить. Весы, правда, совершенствуются, но все же точность измерения в одну миллиардную долю удается достигнуть лишь в редких случаях, и то лишь при сравнении масс двух тел.

Точность измерения массы в граммах и точность измерения гравитационной постоянной в законе тяготения не превосходит 10^{-5}.

В 1971 г. XIV Генеральная конференция по мерам и весам ввела в систему СИ новую единицу — единицу количества вещества, называемую молем.

Введение моля, как самостоятельной единицы количества вещества, связано с новым определением числа Авогадро.

Числом Авогадро условились называть не вообще число атомов в грамм-атоме, а число атомов изотопа углерода с массовым числом 12 в 12 граммах этого элемента. Обозначив через N_A это число, мы теперь договоримся называть молем количество вещества системы, состоящей из N_A частиц. При этом речь может идти о любых частицах, будь то ионы, электроны, атомы, молекулы или иные группы частиц.

Необходимость введения не только новой единицы, а нового физического понятия связана с тем, что мы неправомерно применяем понятие массы к элементарным частицам. Ведь масса — это то, что измеряется рычажными весами.

В настоящее время количество вещества (число Авогадро, а значит, и масса атомов) определяется с меньшей точностью, чем масса. Но, понятно, точность измерения количества вещества не может превысить точность измерения массы.

Возможно, что читателю покажется пустой формальностью введение в обиход этой новой единицы. Пока что оправдание существования двух понятий лежит в различной точности измерения. Если когда-либо удастся представить килограмм как кратное число масс каких-либо атомов, то проблема будет пересмотрена и килограмм станет единицей такого же типа, как секунда и метр.

ПЛОТНОСТЬ

Что подразумевают, когда говорят: тяжелый как свинец, или легкий как пух? Ясно, что крупинка свинца будет легкой, и в то же время гора пуха обладает изрядной массой. Те, кто пользуется подобными сравнениями, имеют в виду не массу тел, а плотность вещества, из которого это тело состоит.

Плотностью тела называется масса единицы объема. Понятно, что плотность свинца одинакова и в крупинке свинца и в массивном блоке.

При обозначении плотности обычно указывают, сколько граммов (г) весит кубический сантиметр (см³) тела,— после числа ставят символ г/см³. Для определения плотности число граммов надо разделить на число кубических сантиметров; дробная черта в символе напоминает об этом.

К самым тяжелым материалам относятся некоторые металлы — осмий, плотность которого равна 22,5 г/см³, иридий (22,4), платина (21,5), вольфрам и золото (19,3). Плотность железа равна 7,88, плотность меди — 8,93.

Наиболее легкими металлами являются магний (1,74), бериллий (1,83) и алюминий (2,70). Еще более легкие тела нужно искать среди органических веществ: различные сорта дерева и пластических масс могут иметь плотность вплоть до 0,4.

Следует оговориться, что речь идет о сплошных телах. Если в твердом теле есть поры, оно, разумеется, будет легче. В технике во многих случаях используются пористые тела — пробка, пеностекло. Плотность пеностекла может быть меньше 0,5, хотя твердое вещество, из которого оно сделано, имеет плотность больше единицы. Как и все тела, у которых плотность меньше единицы, пеностекло превосходно держится на воде.

Самая легкая жидкость — жидкий водород, его можно получить только при очень низкой температуре. Один кубический сантиметр жидкого водорода имеет массу 0,07 г. Органические жидкости — спирт, бензин, керосин — несильно отличаются от воды по плотности. Очень тяжела ртуть, она имеет плотность 13,6 г/см³.

А как характеризовать плотность газов? Ведь газы, как известно, занимают весь объем, который мы им предоставляем. Выпуская из газового баллона одну и ту же массу газа в сосуды разного объема, мы во всех случаях заполним их газом равномерно. Как же тогда говорить о плотности?

Плотность газов определяют при так называемых нормальных условиях — температуре 0 °С и давлении в одну атмосферу. Плотность воздуха при нормальных условиях равна 0,00129 г/см³, хлора — 0,00322 г/см³. Газообразный водород, как и жидкий, ставит рекорд: плотность этого легчайшего газа равна 0,00009 г/см³.

Следующий по легкости газ — гелий, он вдвое тяжелее водорода. Углекислый газ в 1,5 раза тяжелее воздуха. В Италии, близ Неаполя, есть знаменитая «собачья пещера», в нижней части ее непрерывно выделяется углекислый газ, он стелется понизу и медленно выходит из пещеры. Человек может беспрепятственно войти в эту пещеру, для собаки же такая прогулка кончается плохо. Отсюда и название пещеры.

Плотность газов очень чувствительна к внешним условиям — давлению и температуре. Без указания внешних условий значения плотности газов не имеют смысла. Плотности жидких и твердых тел тоже зависят от температуры и давления, но в значительно меньшей степени.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ

Если растворить сахар в воде, то масса раствора будет строго равна сумме масс сахара и воды.

Этот и бесчисленное количество подобных опытов показывают, что масса тела есть неизменное свойство. При любом дроблении и при растворении масса остается одной и той же.

То же самое имеет место и при любых химических превращениях. Сгорел уголь. Тщательными взвешиваниями можно установить, что масса угля и кислорода воздуха, который был затрачен на горение, будет в точности равна массе продуктов сгорания.

Последний раз закон сохранения массы проверялся в конце XIX в., когда техника точного взвешивания была уже очень сильно развита. Оказалось, что при любых химических превращениях масса не изменяется даже на ничтожнейшую долю своей величины.

Еще древние считали, что масса неизменна. Впервые настоящей проверке опытом этот закон подвергся в 1756 г. Сделал это и показал научное значение закона Михаил Васильевич Ломоносов, доказавший опытами в 1756 г. сохранение массы при обжиге металла.

Масса — важнейшая неизменная характеристика тела. Большинство свойств тел находится, так сказать,

МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛОМОНОСОВ (1711—1765) — замечательный русский ученый, зачинатель науки в России, великий просветитель. В области физики Ломоносов решительно боролся с распространенными в XVIII в. представлениями об электрических и тепловых «жидкостях», отстаивая молекулярно-кинетическую теорию материи. Ломоносов впервые экспериментально доказал закон постоянства массы веществ, участвующих в химических превращениях. Ломоносов проводил обширные исследования в области атмосферного электричества и метеорологии. Он построил ряд замечательных оптических приборов, открыл атмосферу на Венере. Ломоносов создал основы русского научного языка; ему удалось исключительно удачно перевести с латинского языка основные физические и химические термины.

в руках человека. Закалкой можно мягкое, гнущееся в руках железо сделать твердым и хрупким. При помощи ультразвуковой волны можно сделать прозрачным мутный раствор. Механические, электрические, тепловые свойства могут меняться благодаря внешним действиям. Если не добавлять к телу вещества и не отделять от тела ни одной частички, то массу тела изменить невозможно *), к каким бы внешним действиям мы ни прибегали.

ДЕЙСТВИЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ

Мы зачастую не обращаем внимания на то, что любое действие силы сопровождается противодействием. Если на пружинную кровать положить чемодан, то кровать прогнется. То, что вес чемодана действует на кровать, очевидно каждому. Иногда, однако, забывают, что и на чемодан действует сила со стороны кровати. Ведь лежащий на кровати чемодан не падает; это значит, что со стороны кровати на него действует сила, равная весу чемодана и направленная вверх.

Силы, направленные противоположно силе тяжести, часто называют реакциями опоры. Слово «реакция» означает «ответное действие». Действие стола на лежащую на нем книгу, действие кровати на положенный на нее чемодан — это реакции опоры.

Как мы говорили только что, вес тела определяют при помощи пружинных весов. Давление тела на подставленную под него пружину или сила, растягивающая пружину, на которую подвешен груз, равны весу тела. Очевидно, однако, что сжатие или растяжение пружины в одинаковой степени показывают и величину реакции опоры.

Так что, измеряя пружиной величину какой-либо силы, мы измеряем величину не одной, а двух сил, противоположно направленных. Пружинные весы измеряют и давление груза на чашку весов, и реакцию опоры — действие чашки весов на груз. Прикрепив пружину к стене и растягивая ее рукой, мы можем измерить силу,

*) О некоторых ограничениях этого утверждения читатель узнает ниже.

с которой рука тянет пружину, и одновременно силу, с которой пружина тянет руку.

Таким образом, силы обладают замечательным свойством: они встречаются всегда по две и притом равными и противоположно направленными. Эти две силы и называют обычно действием и противодействием.

«Одиночных» сил в природе не существует, реально существуют лишь взаимодействия между телами; при этом силы действия и противодействия неизменно равны, они относятся одна к другой как предмет и изображение в зеркале.

Не надо путать уравновешивающиеся силы с силами действия и противодействия.

Про силы говорят, что они уравновешены тогда, когда они приложены к одному телу; так, вес книги, лежащей на столе (действие Земли на книгу), уравновешивается реакцией стола (действие стола на книгу).

В противоположность силам, которые возникают при уравновешивании двух взаимодействий, силы действия и противодействия характеризуют одно взаимодействие, например стола с книгой. Действие — «стол — книга», противодействие — «книга — стол». Конечно, эти силы приложены к разным телам.

Постараемся объяснить традиционное недоумение: «лошадь тянет телегу, но ведь и телега тянет лошадь; почему же они движутся?» Прежде всего надо напомнить, что лошадь не потянет телегу, если дорога скользкая. Значит, для объяснения движения надо учесть не одно, а два взаимодействия — не только «телега — лошадь», но и «лошадь—дорога». Движение начнется, когда сила взаимодействия лошади с дорогой (сила, с которой лошадь отталкивается от дороги) станет больше силы взаимодействия «лошадь — телега» (силы, с которой телега тянет лошадь). Что же касается сил «телега тянет лошадь» и «лошадь тянет телегу», то они характеризуют одно и то же взаимодействие, а значит, будут одинаковы и в покое, и в любой момент движения.

КАК СКЛАДЫВАТЬ СКОРОСТИ

Если я ждал полчаса и еще час, то всего я потерял полтора часа. Если мне дали рубль, а затем еще два, то я всего получил три рубля. Если я купил 200 г винограда, а затем еще 400 г, то у меня будет 600 г винограда. Про время, массу и другие подобные величины говорят, что они складываются арифметически.

Однако не всякие величины можно так просто складывать и вычитать. Если я скажу, что от Москвы до Коломны 100 км, а от Коломны до Каширы 40 км, то отсюда не следует, что при путешествии от Каширы до Москвы по кратчайшей дороге придется проделать путь, равный арифметической сумме 100 и 40 км. Перемещения не складываются арифметически.

Как же еще можно складывать величины? На нашем примере мы легко найдем нужное правило. Нанесем на бумагу три точки, которые указывают взаимное расположение интересующих нас трех пунктов (рис. 1.4). На этих трех точках можно построить треугольник. Если две стороны его известны, то можно найти и третью. Для этого, однако, надо знать угол между двумя заданными отрезками.

Наше движение из Москвы в Коломну можно изобразить стрелкой. Ее направление указывает, в какую сторону мы движемся. Подобные стрелки называются векторами. Путь из Коломны в Каширу показан другим вектором.

А как изобразить дорогу от Москвы до Каширы? Ну, конечно, соответствующим вектором. Мы его построим, соединяя начало первого отрезка с концом второго. Искомый путь изобразился замыкающим отрезком.

Сложение описанным способом называется геометрическим, а величины, складываемые этим способом, называются векторными.

Для того чтобы отличить начало и конец отрезка, его снабжают стрелкой. Такой отрезок — вектор — указывает длину и направление.

Это правило применяется и при сложении нескольких векторов. Переходя из первой точки во вторую, из второй — в третью и т. д., мы пройдем путь, который можно изобразить ломаной линией. Но к той же самой точке можно пройти прямо из отправного пункта. Этот отрезок, замыкающий многоугольник, и будет векторной суммой.

Векторный треугольник показывает, разумеется, и как вычитать один вектор из другого. Для этого прово-

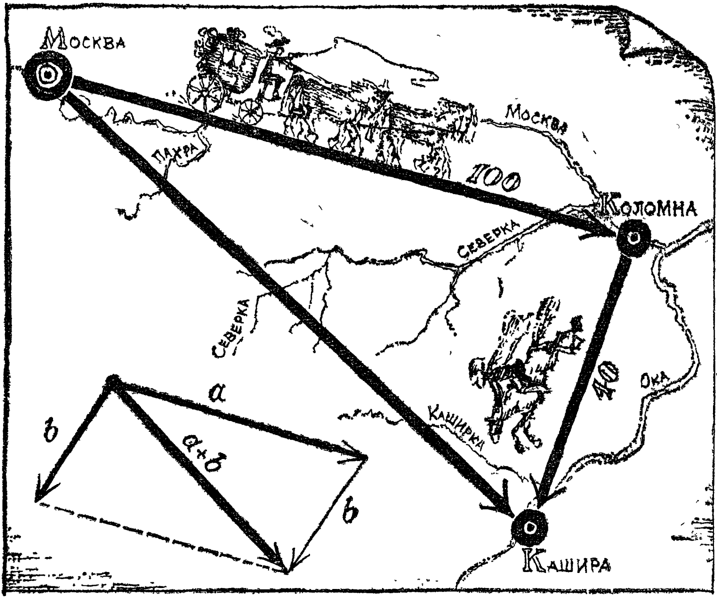


Рис. 1.4.

дят их из одной точки. Вектор, проведенный из конца второго в конец первого, и будет разностью векторов.

Кроме правила треугольника, можно пользоваться равноценным ему правилом параллелограмма (рис. 1.4 внизу, слева). Это правило требует построения параллелограмма на складывающихся векторах и проведения диагонали из их пересечения. На рисунке видно, что диагональ параллелограмма и есть замыкающая треугольника. Значит, оба правила одинаково пригодны.

Векторы используются для описания не только перемещений. Векторные величины встречаются в физике часто.

Рассмотрим, например, скорость движения. Скорость есть перемещение за единицу времени. Раз перемещение — вектор, то и скорость — вектор, смотрящий в ту же сторону. При движении по кривой линии направление перемещения все время изменяется. Как же ответить на вопрос о направлении скорости? Небольшой отрезок кривой направлен так же, как касательная. Поэтому перемещение и скорость тела в каждый данный момент направлены по касательной к линии движения.

Складывать и вычитать скорости по правилу векторов приходится во многих случаях. Необходимость в сложении скоростей возникает, когда тело участвует одновременно в двух движениях. Такие случаи нередки: человек идет по поезду и, кроме того, движется вместе с поездом; капля воды, стекающая по стеклу вагонного окна, движется вниз под действием веса и путешествует вместе с поездом; земной шар движется вокруг Солнца и вместе с Солнцем совершает движение по отношению к другим звездам. Во всех этих и других подобных случаях скорости складываются по правилу сложения векторов.

Если оба движения происходят вдоль одной линии, то векторное сложение превратится в обычное сложение, когда оба движения направлены в одну сторону, и в вычитание, когда движения противоположны.

А если движения происходят под углом? Тогда мы прибегнем к геометрическому сложению.

Если, переправляясь через быструю реку, вы будете держать руль поперек течения, вас снесет вниз. Лодка участвовала в двух движениях: поперек реки и вдоль реки. Суммарная скорость лодки показана на рис. 1.5.

Еще один пример. Как выглядит движение дождевой струи из окна поезда? Вы, наверное, наблюдали дождь из окон вагона. Даже в безветренную погоду он

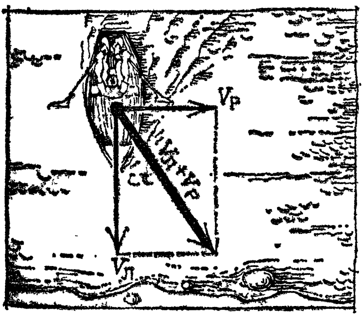


Рис. 1.5.

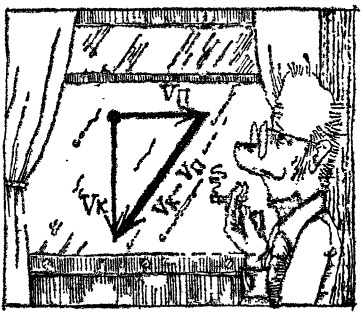


Рис. 1.6.

идет косо, так, как будто его отклоняет ветер, дующий в лоб паровозу (рис. 1.6).

Если погода безветренная, капля дождя падает вертикально вниз. Но за время падения капли вдоль окна поезд проходит изрядный путь, убегает от вертикали падения, поэтому дождь и кажется косым.

Если скорость поезда $\boldsymbol{v}_п$, а скорость падения капли $\boldsymbol{v}_к$, то скорость падения капли по отношению к пассажиру поезда получится векторным вычитанием $\boldsymbol{v}_п$ из $\boldsymbol{v}_к$*). Треугольник скоростей показан на рис. 1.6. Направление косого вектора указывает направление дождя; теперь ясно, почему мы видим дождь косым. Длина косой стрелки дает в выбранном масштабе величину этой скорости. Чем быстрее идет поезд и чем медленнее падает капля, тем более косыми покажутся нам дождевые струи.

СИЛА — ВЕКТОР

Сила, так же как и скорость, есть векторная величина. Ведь она всегда действует в определенном направлении. Значит, и силы должны складываться по тем правилам, которые мы только что обсуждали.

Мы часто наблюдаем в жизни примеры, иллюстрирующие векторное сложение сил. На рис. 1.7 показан канат, на котором висит тюк. Веревкой человек оттягивает тюк в сторону. Канат натянут действием двух сил: силы тяжести тюка и силы человека.

Правило векторного сложения сил позволяет определить направление каната и вычислить силу его натяжения. Тюк находится в покое; значит, сумма действующих на него сил должна равняться нулю. А можно сказать и так — натяжение каната должно равняться сумме силы тяжести тюка и силы тяги в сторону, осуществляемой при помощи веревки. Сумма этих сил даст диагональ параллелограмма, которая будет направлена вдоль каната (ведь иначе она не сможет «уничтожиться» силой натяжения каната). Длина этой стрелки должна

*) Здесь и в дальнейшем мы будем жирными буквами обозначать векторы, т. е. характеристики, для которых существенна не только величина, но и направление.

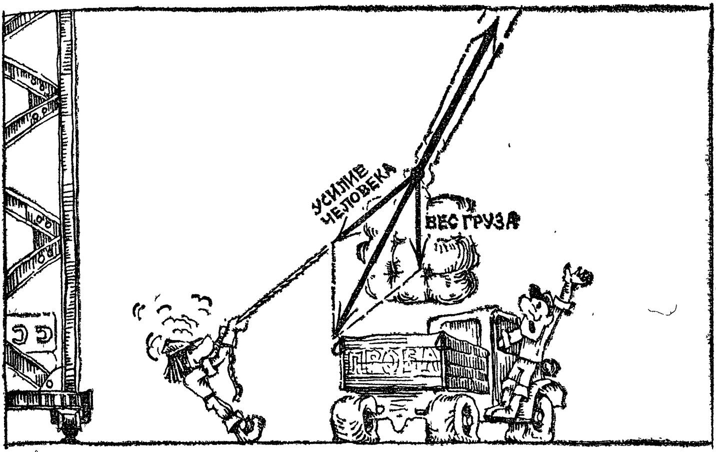


Рис. 1.7.

будет изображать силу натяжения каната. Такой силой можно было бы заменить две силы, действующие на тюк. Векторную сумму сил поэтому иногда называют равнодействующей.

Очень часто возникает задача, обратная сложению сил. Лампа висит на двух тросах. Для того чтобы определить силы натяжения тросов, вес лампы надо разложить по этим двум направлениям.

Из конца равнодействующего вектора (рис. 1.8) проведем линии, параллельные тросам, до пересечения с ними. Параллелограмм сил построен. Измеряя длины сторон параллелограмма, находим (в том же масштабе, в котором изображен вес) величины натяжений канатов.

Такое построение называется разложением силы.

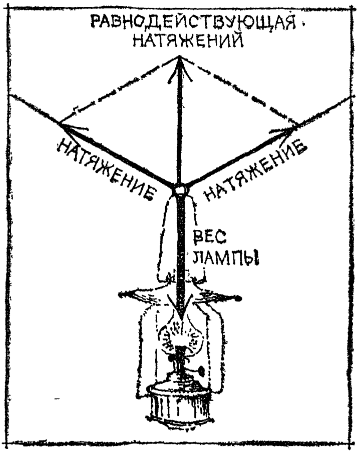


Рис. 1.8.

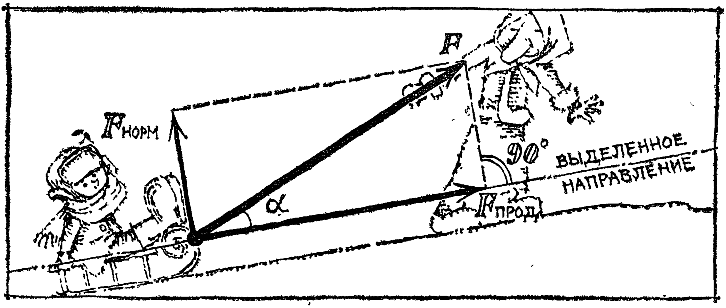


Рис. 1.9.

Всякое число можно представить бесконечным множеством способов в виде суммы двух или нескольких чисел; то же можно сделать и с вектором силы: любую силу можно разложить на две силы — стороны параллелограмма,— из которых одну всегда можно выбрать какой угодно. Ясно также, что к каждому вектору можно пристроить любой многоугольник.

Часто бывает удобным разложить силу на две взаимно перпендикулярные — одну вдоль интересующего нас направления и другую перпендикулярно к этому направлению. Их называют продольной и нормальной (перпендикулярной) составляющей силы.

Составляющую силы по какому-то направлению, построенную разложением по сторонам прямоугольника, называют еще проекцией силы на это направление.

Ясно, что на рис. 1.9

$$F^2 = F^2_{\text{прод}} + F^2_{\text{норм}},$$

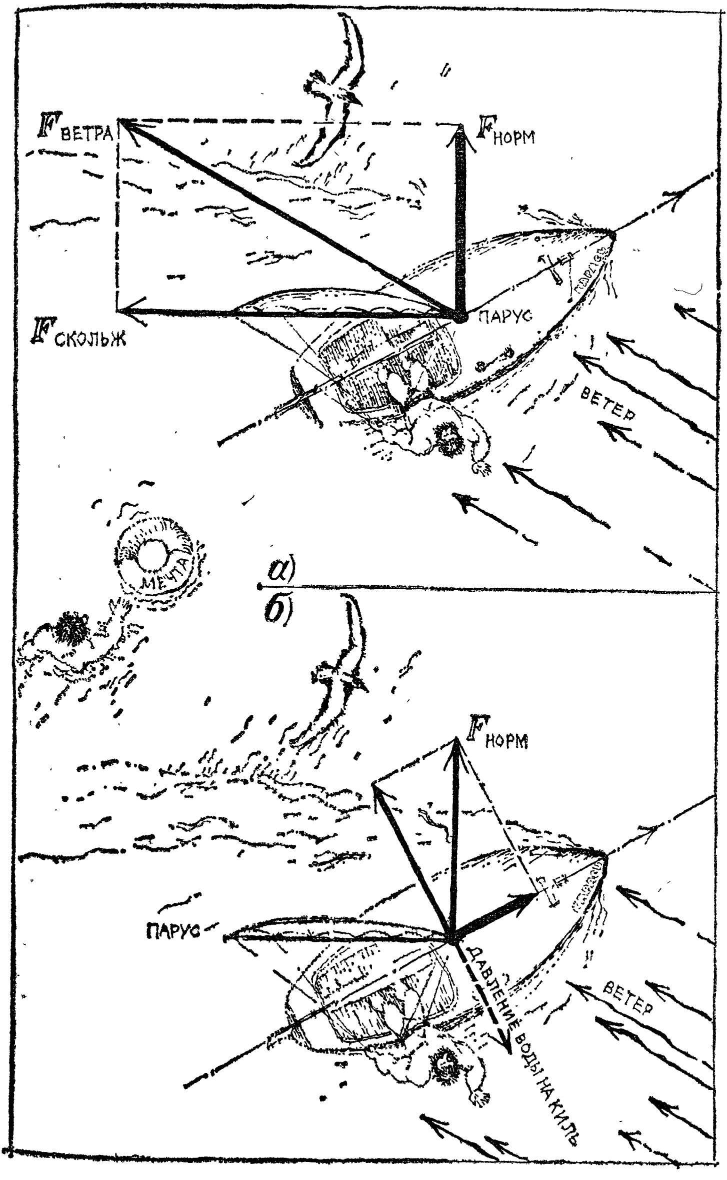
где $F_{\text{прод}}$ и $F_{\text{норм}}$ — проекции силы на выбранное направление и нормаль к нему.

Знающие тригонометрию без труда установят, что

$$F_{\text{прод}} = F \cdot \cos\alpha,$$

где α — угол между вектором силы и направлением, на которое она проецируется.

Очень любопытным примером разложения сил является движение корабля под парусами. Каким образом удается идти под парусами против ветра? Если вам приходилось наблюдать за парусной яхтой в этом случае,



F ветра
F норм
F скольж
ПАРУС
ВЕТЕР
МЕЧТА
а)
б)
F норм
ПАРУС
ВЕТЕР
ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ НА КИЛЬ

Рис. 1.10.

то вы могли заметить, что она движется зигзагами. Моряки называют такое движение лавированием.

Прямо против ветра идти на парусах, конечно, невозможно, но почему удается идти против ветра хотя бы под углом?

Возможность лавировать против ветра основывается на двух обстоятельствах. Во-первых, ветер толкает парус всегда под прямым углом к его плоскости. Посмотрите на рис. 1.10, *а*: сила ветра разложена на две составляющие — одна из них $F_{\text{скольж}}$ заставляет воздух скользить вдоль паруса, а значит, на парус не действует, другая $F_{\text{норм}}$ — нормальная составляющая — оказывает давление на парус.

Но почему же лодка движется не туда, куда ее толкает сила ветра, а примерно туда, куда смотрит нос лодки? Это объясняется тем, что движение лодки поперек килевой линии встречает очень сильное сопротивление воды. Значит, чтобы лодка двигалась носом вперед, надо, чтобы сила давления на парус имела бы составляющую вдоль килевой линии, смотрящую вперед. Это второе обстоятельство показывает рис. 1.10, б.

Для того чтобы найти силу, которая гонит лодку вперед, силу ветра придется разложить второй раз. Нормальную составляющую надо разложить вдоль и поперек килевой линии. Продольная составляющая и гонит лодку под углом к ветру, а поперечная уравновешивается давлением воды на киль лодки. Чаще всего парус устанавливают так, чтобы его плоскость делила пополам угол между направлением хода лодки и направлением ветра.

НАКЛОННАЯ ПЛОСКОСТЬ

Крутой подъем труднее преодолеть, чем отлогий. Легче вкатить тело на высоту по наклонной плоскости, чем поднимать его по вертикали. Почему так и насколько легче? Закон сложения сил позволяет нам разобраться в этих вопросах.

На рис. 1.11 показана тележка на колесах, которая натяжением веревки удерживается на наклонной плоскости. Кроме тяги на тележку действуют еще две силы — вес и сила реакции опоры, действующая всегда по нормали к поверхности, вне зависимости от того, горизонтальная поверхность опоры или наклонная.

Как уже говорилось, если тело давит на опору, то опора противодействует давлению или, как говорят, создает силу реакции.

Нас интересует, в какой степени тащить тележку вверх легче по наклонной плоскости, чем поднимать вертикально.

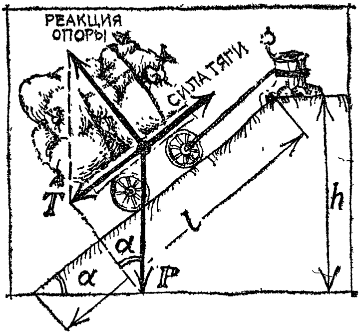


Рис. 1.11.

Разложим силы так, чтобы одна была направлена вдоль, а другая — перпендикулярно к поверхности, по которой движется тело. Для того чтобы тело покоилось на наклонной плоскости, сила натяжения веревки должна уравновешивать лишь продольную составляющую. Что же касается второй составляющей, то она уравновешивается реакцией опоры.

Найти интересующую нас силу натяжения каната T можно или геометрическим построением или при помощи тригонометрии. Геометрическое построение состоит в проведении из конца вектора веса P перпендикуляра к плоскости.

На рисунке можно отыскать два подобных треугольника. Отношение длины наклонной плоскости l к высоте h равно отношению соответствующих сторон в треугольнике сил. Итак,

$$T/P = h/l.$$

Чем более отлога наклонная плоскость (h/l невелико), тем, разумеется, легче тащить тело вверх.

А теперь для тех, кто знает тригонометрию: так как угол между поперечной составляющей веса и вектором веса равен углу α наклонной плоскости (это углы со взаимно перпендикулярными сторонами), то

$$T/P = \sin\alpha \quad \text{и} \quad T = P\cdot\sin\alpha.$$

Итак, вкатить тележку по наклонной плоскости с углом α в $1/\sin\alpha$ раз легче, чем поднять ее вертикально.

Полезно помнить значения тригонометрических функций для углов 30, 45 и 60°. Зная эти цифры для синуса ($\sin 30° = 1/2$; $\sin 45° = \sqrt{2}/2$; $\sin 60° = \sqrt{3}/2$), мы получим хорошее представление о выигрыше в силе при движении по наклонной плоскости.

Из формул видно, что при угле наклонной плоскости в 30° наши усилия составят половину веса: $T = P/2$. При углах 45° и 60° придется тянуть канат с силами, равными примерно 0,7 и 0,9 от веса тележки. Как видим, такие крутые наклонные плоскости мало облегчают дело.

Глава 2

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

РАЗНЫЕ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ

Чемодан лежит на полке вагона. В то же время он движется вместе с поездом. Дом стоит на Земле, но вместе с ней и движется. Про одно и то же тело можно сказать: движется прямолинейно, покоится, вращается. И все суждения будут верны, но с разных точек зрения.

Не только картина движения, но и свойства движения могут быть совсем разными, если их рассматривать с разных точек зрения.

Вспомните, что происходит с предметами на пароходе, попавшем в качку. До чего они непослушны! Пепельница, поставленная на стол, опрокинулась и стремительно понеслась под кровать. Плещется вода в графине, и лампа колеблется, словно маятник. Без каких-либо видимых причин одни предметы приходят в движение, другие останавливаются. Основной закон движения, мог бы сказать наблюдатель на таком пароходе, состоит в том, что в любой момент времени незакрепленный предмет может отправиться в путешествие в любом направлении с самой различной скоростью.

Этот пример показывает, что среди различных точек зрения на движение имеются явно неудобные.

Какая же точка зрения наиболее «разумная»?

Если бы вдруг, ни с того ни с сего, лампа на столе наклонилась или пресс-папье подпрыгнуло, то вы подумали бы сначала, что это вам почудилось. Если бы эти чудеса повторились, вы настойчиво стали бы искать причину, которая выводит эти тела из состояния покоя.

Поэтому совершенно естественно считать рациональной точкой зрения на движение такую, при которой покоящиеся тела не сдвигаются с места без действия силы. Такая точка зрения кажется весьма естественной: покоится тело — значит, сумма сил, действующих на него, равна нулю. Сдвинулось с места — это произошло под действием силы.

Точка зрения предполагает наличие наблюдателя. Однако нас интересует не сам наблюдатель, а место, где он находится. Поэтому вместо «точка зрения на движение» мы будем говорить: «система отсчета, в которой рассматривается движение», или просто «система отсчета».

Для нас, обитателей Земли, важной системой отсчета является Земля. Однако зачастую системами отсчета могут служить и движущиеся по Земле тела, скажем, пароход или поезд.

Возвратимся теперь к «точке зрения» на движение, которую мы назвали рациональной. У этой системы отсчета есть имя — она называется инерциальной.

Откуда взялся этот термин, мы увидим немного ниже.

Свойства инерциальной системы отсчета, следовательно, таковы: тела, находящиеся в состоянии покоя по отношению к этой системе, не испытывают действия сил. Значит, в этой системе ни одно движение не начинается без действия силы. Простота и удобства такой системы отсчета очевидны. Ясно, что ее стоит взять за основу.

Чрезвычайно важно то обстоятельство, что система отсчета, связанная с Землей, не очень отличается от инерциальной системы. Мы можем поэтому приступить к изучению основных закономерностей движения, рассматривая их с точки зрения Земли. Однако надо помнить, что, строго говоря, все, что будет сказано в следующем параграфе, относится к инерциальной системе отсчета.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ

Не приходится спорить — инерциальная система отсчета удобна и обладает неоценимыми преимуществами.

Но единственная ли это система или, может быть, существует много инерциальных систем? Древние греки, например, стояли на первой точке зрения. В их сочинениях мы находим много наивных размышлений о причинах движения. Эти представления находят завершение у Аристотеля. По мнению этого философа, естественным положением тела является покой,— конечно, по отношению к Земле. Всякое же перемещение тела по отношению к Земле должно иметь причину — силу. Если же причины двигаться нет, то тело должно остановиться, перейти в свое естественное состояние. А таковым является покой по отношению к Земле. Земля с этой точки зрения есть единственная инерциальная система.

Открытием истины и опровержением этого неверного, но очень близкого наивной психологии мнения мы обязаны великому итальянцу Галилео Галилею (1564—1642).

Задумаемся над аристотелевым объяснением движения и поищем в знакомых нам явлениях подтверждения или опровержения мысли о естественном покое тел, находящихся на Земле.

Представим, что мы находимся в самолете, отбывшем из аэропорта на рассвете. Солнце не нагрело еще воздуха, нет «воздушных ям», причиняющих многим пассажирам неприятности. Самолет движется плавно, неощутимо. Если не смотреть в иллюминатор, то и не заметишь, что летишь. На свободном кресле лежит книга, на столике покоится яблоко. Все предметы внутри самолета неподвижны. Так ли должно быть, если прав Аристотель? Конечно, нет. Ведь естественным положением тела является, по Аристотелю, покой на Земле. Почему же тогда все предметы не собрались у задней стенки самолета, стремясь отстать от его движения, «желая» перейти в состояние «истинного» покоя? Что заставляет лежащее на столе яблоко, едва соприкасающееся с поверхностью стола, двигаться с огромной скоростью в несколько сот километров в час?

Каково же правильное решение вопроса о причине движения? Поинтересуемся сначала, почему движущиеся тела останавливаются. Например, почему останавливается катящийся по земле шар. Чтобы дать правильный ответ, следует подумать, в каких случаях шар останавливается быстро, а в каких медленно. Для этого не нужны специальные опыты. Из житейской

ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ (1564—1642) — великий итальянский физик и астроном, впервые применивший экспериментальный метод исследования в науке. Галилей ввел понятие инерции, установил относительность движения, исследовал законы падения тел и движения тел по наклонной плоскости, законы движения при бросании предмета под углом к горизонту, применил маятник для измерения времени. Впервые в истории человечества он направил зрительную трубу на небо, открыл множество новых звезд, доказал, что Млечный Путь состоит из огромного числа звезд, открыл спутники Юпитера, солнечные пятна, вращение Солнца, исследовал строение лунной поверхности. Галилей активно поддерживал запрещенную в те времена католической церковью гелиоцентрическую систему Коперника. Гонения со стороны инквизиции омрачили последние десять лет жизни великого ученого.

практики превосходно известно: чем более гладкой является поверхность, по которой движется шар, тем дальше он катится. Из этих и подобных опытов вырастает естественное представление о силе трения как о помехе движению, как о причине торможения предмета, катящегося или скользящего по земле. Различными способами можно уменьшить трение. Гладкость дороги, хорошая смазка, совершенные подшипники позволяют движущемуся телу пройти свободно без действия внешней силы тем бо́льший путь, чем больше мы потрудимся над уменьшением всяческих сопротивлений движению.

Возникает вопрос: а что бы произошло, если бы сопротивления не было, если бы силы трения отсутствовали? Очевидно, в этом случае движение продолжалось бы бесконечно, с неизменной скоростью и вдоль одной и той же прямой линии.

Мы сформулировали закон инерции примерно в той форме, как он был дан впервые Галилеем. Инерция есть краткое обозначение этой способности тела двигаться прямолинейно и равномерно... без всякой причины вопреки Аристотелю. Инерция есть неотъемлемое свойство каждой частички во Вселенной.

Каким же образом проверить справедливость этого замечательного закона? Ведь невозможно создать такие условия, при которых на движущееся тело не действовали бы никакие силы. Это верно, но зато можно проследить обратное. В любом случае, когда тело изменяет скорость или направление своего движения, всегда можно найти причину — силу, которой это изменение обязано.

Тело приобретает скорость, падая на Землю; причина — сила притяжения Земли. Камень крутится на веревке, описывая окружность; причина, отклоняющая камень от прямолинейного пути,— натяжение веревки. Оборвется веревка — и камень улетит прочь в том направлении, в котором он двигался в момент обрыва веревки. Замедляется движение автомобиля, бегущего с выключенным мотором; причина — сопротивление воздуха, трение шин о дорогу и несовершенство подшипников.

Закон инерции есть тот фундамент, на котором покоится все учение о движении тел.

ДВИЖЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО

Закон инерции приводит нас к выводу о множественности инерциальных систем.

Не одна, а множество систем отсчета исключают «беспричинные» движения.

Если одна такая система найдена, то сразу же найдется и другая, движущаяся поступательно (без вращения), равномерно и прямолинейно по отношению к первой. При этом одна инерциальная система ничуть не лучше других, ничем не отличается от других. Нельзя никак отыскать среди множества инерциальных систем одну наилучшую. Законы движения тел во всех инерциальных системах одинаковы: тела приходят в движение лишь под действием сил, тормозятся силами, а при отсутствии действия сил или покоятся, или движутся равномерно и прямолинейно.

Невозможность какими-либо опытами выделить чем-либо одну инерциальную систему по отношению к другим составляет суть так называемого принципа относительности Галилея — одного из важнейших законов физики.

Но хотя точки зрения наблюдателей, изучающих явления в двух инерциальных системах, вполне равноправны, суждения их об одном и том же факте различны. Скажем, один из наблюдателей скажет, что стул, на котором он сидит в движущемся поезде, находится все время в одном месте пространства, другой же наблюдатель, находящийся на платформе, станет утверждать, что этот стул перемещается из одного места в другое. Или один наблюдатель, выстрелив из ружья, скажет, что пуля вылетела со скоростью 500 м/с, а другой наблюдатель, если он находится в системе, движущейся в том же направлении со скоростью 200 м/с, скажет, что пуля летит значительно медленнее — со скоростью 300 м/с.

Кто же из двоих прав? Оба. Ведь принцип относительности движения не позволяет отдать предпочтение какой-либо одной инерциальной системе.

Выходит, что о месте в пространстве и о скорости движения нельзя выносить общих, безоговорочно справедливых, как говорят, абсолютных суждений. Понятия места пространства и скорости движения относительны.

говоря о таких относительных понятиях, необходимо указывать, какая инерциальная система отсчета имеется в виду.

Таким образом, отсутствие одной-единственной «правильной» точки зрения на движение приводит нас к признанию относительности пространства. Пространство можно было бы назвать абсолютным лишь в том случае, если бы удалось найти покоящееся в нем тело — покоящееся с точки зрения всех наблюдателей. Но это как раз и невозможно.

Относительность пространства означает, что пространство нельзя представлять себе как что-то такое, во что вкраплены тела.

Относительность пространства была признана наукой не сразу. Даже такой гениальный ученый, как Ньютон, считал пространство абсолютным, хотя и понимал, что установить это никак нельзя. Неверная точка зрения была распространена среди значительной части физиков вплоть до конца XIX в. Причины этого имеют, видимо, психологический характер: уж очень мы привыкли видеть вокруг себя незыблемые «те же места пространства».

Теперь нам надо разобраться, какие абсолютные суждения можно выносить о характере движения.

Если тела движутся по отношению к одной системе отсчета со скоростями v_1 и v_2, то их разность (разумеется, векторная) v_1-v_2 будет одинакова для любого инерциального наблюдателя, так как обе скорости v_1 и v_2 при изменении системы отсчета меняются на одинаковую величину.

Итак, векторная разность скоростей двух тел абсолютна. Если так, то и вектор приращения скорости одного и того же тела за определенный промежуток времени абсолютен, т. е. величина его одинакова для всех инерциальных наблюдателей.

ТОЧКА ЗРЕНИЯ ЗВЕЗДНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ

Мы решили изучать движение с точки зрения инерциальных систем. Не придется ли тогда отказаться от услуг земного наблюдателя? Ведь Земля вращается вокруг оси и вокруг Солнца, как доказал Коперник. Сейчас читателю, может быть, трудно почувствовать революционность открытия Коперника, трудно представить себе, что, отстаивая справедливость его идей, Джордано Бруно пошел на костер, а Галилей терпел унижение и ссылку.

В чем же подвиг гения Коперника? Почему открытие вращения Земли можно ставить в один ряд с идеями человеческой справедливости, за которые передовые люди были способны отдать жизнь?

Галилей в своем «Разговоре о двух главных системах мира, птолемеевой и коперниковой», за написание которого он подвергся гонениям церкви, дал противнику коперникианской системы имя Симпличио, что значит «простак».

Действительно, с точки зрения простого непосредственного восприятия мира, того, что не очень удачно называют «здравым смыслом», система Коперника кажется дикой. Как так Земля вертится? Ведь я ее вижу, она неподвижна, а вот Солнце и звезды, действительно, движутся.

Отношение богословов к открытию Коперника показывает такое заключение собрания теологов (1616 г.):

«Учение, что Солнце находится в центре мира и неподвижно, ложно и нелепо, формально еретично и противно священному писанию, а учение, будто Земля не лежит в центре мира и движется, вдобавок обладая суточным вращением, ложно и нелепо с философской точки зрения, с богословской же по меньшей мере ошибочно».

Это заключение, в котором непонимание законов природы и вера в непогрешимость догматов религии перемешаны с ложным «здравым смыслом», лучше всего свидетельствует о силе духа и разума Коперника и его последователей, столь решительно порвавших с «истинами» XVII в.

Но вернемся к поставленному выше вопросу.

Если скорость движения наблюдателя меняется или если наблюдатель вращается, то он должен быть выведен из числа «правильных» наблюдателей. А ведь именно в таких условиях находится наблюдатель на Земле. Однако если изменение скорости или поворот наблюдателя за время, пока он изучает движение, невелики,

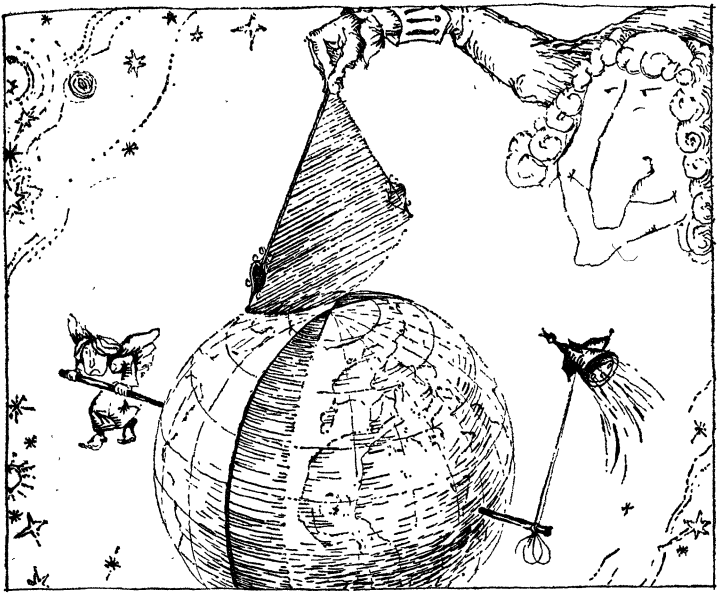


Рис. 2.1.

то такого наблюдателя можно условно считать «правильным». Будет ли это относиться к наблюдателю на земном шаре?

За одну секунду Земля повернется на 1/240 градуса, т. е. примерно на 0,00007 радиана. Это не так уж много. Поэтому по отношению к очень многим явлениям Земля — вполне инерциальная система.

Однако при длительных явлениях забывать про вращение Земли уже нельзя.

Под куполом Исаакиевского собора в Ленинграде одно время был подвешен громадный маятник. Если привести этот маятник в колебательное движение, то через непродолжительное время можно заметить, что плоскость его колебания медленно поворачивается. Через несколько часов плоскость колебания повернется на заметный угол. Такой опыт с таким маятником впервые проделан французским ученым Фуко и с тех пор носит его имя. Опыт Фуко наглядно показывает вращение Земли (рис. 2.1).

Итак, если наблюдаемое движение продолжается долгое время, то мы вынуждены отказаться от услуг земного наблюдателя и взять за основу систему отсчета, связанную с Солнцем и звездами. Такой системой пользовался Коперник, считавший Солнце и окружающие нас звезды неподвижными.

Однако в действительности система Коперника не вполне инерциальна.

Вселенная состоит из множества звездных скоплений — островов Вселенной, которые называются галактиками. В той галактике, куда входит наша Солнечная система, имеется примерно сто миллиардов звезд. Вокруг центра этой галактики Солнце вращается с периодом около 180 миллионов лет со скоростью 250 км/с.

Какая же ошибка будет сделана, если считать солнечного наблюдателя инерциальным?

Для сравнения достоинств земного и солнечного наблюдателей подсчитаем, на какой угол повернется солнечная система отсчета за одну секунду. Если полный оборот совершается за $180 \cdot 10^6$ лет ($6 \cdot 10^{15}$ с), то за одну секунду солнечная система отсчета повернется на $6 \cdot 10^{-14}$ градуса или на угол в 10^{-15} радиана. Можно сказать, что солнечный наблюдатель в 100 миллиардов раз «лучше» земного.

Желая еще больше приблизиться к инерциальной системе, астрономы берут за основу систему отсчета, связанную с несколькими галактиками. Такая система отсчета — наиболее инерциальная из всех возможных. Лучшую систему найти уже невозможно.

Астрономы могут быть названы звездными наблюдателями в двух смыслах: они наблюдают звезды и описывают движения небесных светил с точки зрения звезд.

УСКОРЕНИЕ И СИЛА

Для того чтобы охарактеризовать непостоянство скорости, физика пользуется понятием ускорения.

Ускорением называют изменение скорости за единицу времени. Вместо того чтобы говорить: «скорость тела изменилась на величину *a* за 1 секунду», мы говорим короче: «ускорение тела равно *a*».

Если мы обозначим через v_1 скорость прямолинейного движения в первый момент времени, а через v_2 скорость в последующий, то правило расчета ускорения a выразится формулой

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t},$$

где t — время, в течение которого нарастала скорость.

Скорость измеряется в см/с (или м/с и т. д.), время — в секундах. Значит, ускорение измеряется в см/с за секунду. Число сантиметров в секунду делится на секунды. Таким образом, единица ускорения будет см/с^2 (или м/с^2 и т. д.).

Разумеется, ускорение может меняться во время движения. Однако мы не будем этим непринципиальным обстоятельством усложнять изложение. Будем молчаливо предполагать, что во время движения скорость набирается равномерно. Такое движение называется равномерно-ускоренным.

Что такое ускорение криволинейного движения?

Скорость есть вектор, изменение (разность) скоростей есть вектор, значит, и ускорение — тоже вектор. Для того чтобы найти вектор ускорения, надо разделить векторную разность скоростей на время. А как строить вектор изменения скорости, мы уже говорили.

Шоссе делает поворот. Отметим два близких положения автомашины и скорости ее представим векторами (рис. 2.2). Вычитая векторы, мы получим величину, вовсе не равную нулю; деля ее на промежуток времени, найдем величину ускорения. Ускорение имело место и тогда, когда величина скорости при повороте не менялась. Криволинейное движение всегда ускоренное. Неускоренное только равномерное прямолинейное движение.

Говоря о скорости движения тела, мы все время оговаривали точку зрения на движение. Скорость тела относительна. С точки зрения одной инерциальной системы она может быть большой, с точки зрения другой инерциальной системы — малой. Не нужно ли делать такие же оговорки, когда мы говорим об ускорении? Конечно, нет. Ускорение в противоположность скорости

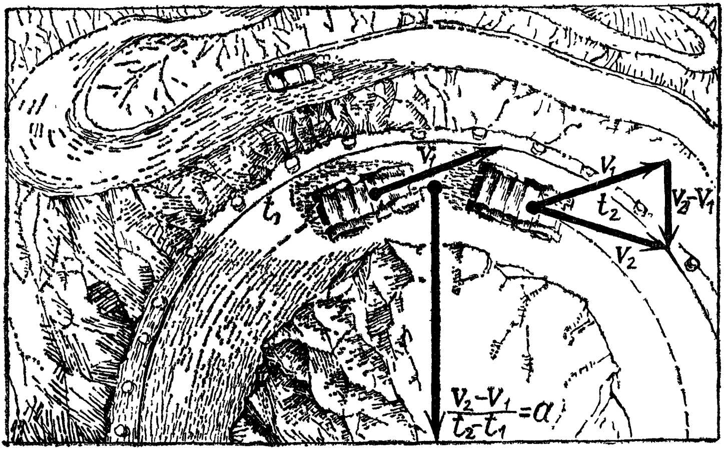


Рис. 2.2.

абсолютно. С точки зрения всех мыслимых инерциальных систем ускорение будет одним и тем же. Действительно, ведь ускорение зависит от разности скоростей тела в первый и второй момент времени, а эта разность, как мы уже знаем, будет одинаковой со всех точек зрения, т. е. является абсолютной.

Если на тело силы не действуют, то оно может двигаться только без ускорения. Напротив, действие на тело силы приводит к ускорению, и при этом ускорение тела будет тем бо́льшим, чем больше сила. Чем скорее мы хотим привести в движение тележку с грузом, тем больше придется напрягать свои мускулы. Как правило, на движущееся тело действуют две силы: ускоряющая — сила тяги, и тормозящая — сила трения или сопротивления воздуха.

Разность этих двух сил, так называемая результирующая сила, может быть направлена вдоль или против движения. В первом случае тело убыстряет движение, во втором — замедляет. Если эти две противоположно действующие силы равны одна другой (уравновешиваются), то тело движется равномерно, так, как если бы на него вообще не действовали силы.

Как же связаны сила и создаваемое ею ускорение? Ответ оказывается очень простым. Ускорение пропорционально силе:

$$a \sim F.$$

(Знак $\sim$ означает «пропорционально».)

Но остается решить еще один вопрос: как влияют свойства тела на его способность ускорять движение под действием той или иной силы? Ведь ясно, что одна и та же сила, действуя на различные тела, придает им разные ускорения.

Ответ на поставленный вопрос мы найдем в том замечательном обстоятельстве, что все тела падают на Землю с одинаковым ускорением. Это ускорение обозначают буквой g. В районе Москвы ускорение $g=981$ см/с^2.

Непосредственное наблюдение, на первый взгляд, не подтверждает одинаковости ускорения для всех тел. Дело в том, что при падении тел в обычных условиях, кроме силы тяжести, на них действует и «мешающая» сила — сопротивление воздуха. Различие в характере падения легких и тяжелых тел весьма смущало философов древности. Кусок железа падает быстро, пушинка парит в воздухе. Медленно опускается на Землю раскрытый лист бумаги, однако, свернутый в комок, этот же лист падает значительно быстрее. То, что воздух искажает «истинную» картину движения тела под действием Земли, понимали уже древние греки. Однако Демокрит думал, что, если даже удалить воздух, тяжелые тела будут всегда падать быстрее, чем легкие. А ведь сопротивление воздуха может привести и к обратному — скажем, листок алюминиевой фольги (широко развернутой) будет падать медленнее, чем шарик, скомканный из кусочка бумаги.

Кстати говоря, сейчас изготовляется металлическая проволока настолько тонкая (несколько микрон), что она парит в воздухе, как пушинка.

Аристотель считал, что в вакууме все тела должны падать одинаково. Однако из этого умозрительного заключения он делал следующий парадоксальный вывод: «падение разных тел с одинаковой скоростью настолько абсурдно, что ясна невозможность существования вакуума».

Никто из ученых древних и средних веков не догадался проверить на практике, с разными или одинаковыми ускорениями падают на Землю тела. Лишь

ИСААК НЬЮТОН (1643—1727) — гениальный английский физик и математик, один из величайших ученых в истории человечества. Ньютон сформулировал основные понятия и законы механики, открыл закон всемирного тяготения, создав тем самым физическую картину мира, остававшуюся неприкосновенной до начала XX в. Он разработал теорию движения небесных тел, объяснил важнейшие особенности движения Луны, дал объяснение приливов и отливов. В оптике Ньютону принадлежат замечательные открытия, способствовавшие бурному развитию этого раздела физики. Ньютон разработал могучий метод математического исследования природы; ему принадлежит честь создания дифференциального и интегрального исчисления. Это оказало громадное влияние на все последующее развитие физики, способствовало внедрению в нее математических методов исследования.

Галилей своими замечательными опытами (он исследовал движение шаров по наклонной плоскости и падение тел, сбрасываемых с вершины наклонной Пизанской башни) показал, что все тела, вне зависимости от массы, падают в одном и том же месте земного шара с одинаковым ускорением. В настоящее время эти опыты весьма просто продемонстрировать при помощи длинной трубки, из которой выкачан воздух. Пушинка и камень падают в такой трубке совершенно одинаково: на тела действует лишь одна сила — вес, сопротивление воздуха сведено к нулю. При отсутствии сопротивления воздуха падение любых тел является равномерно-ускоренным движением.

Теперь вернемся к вопросу, поставленному выше. Как способность тела ускорять движение под действием заданной силы зависит от его свойств?

Закон Галилея говорит, что все тела, вне зависимости от их массы, падают с одним и тем же ускорением; значит, масса m кг под действием силы в F кгс движется с ускорением g.

Теперь предположим, что речь идет не о падении тел и на массу m кг действует сила в 1 кгс. Так как ускорение пропорционально силе, то оно будет в m раз меньше g.

Мы пришли к выводу, что ускорение тела a при заданной силе (в нашем примере в 1 кгс) обратно пропорционально массе.

Объединяя оба вывода, мы можем записать:

$$a \sim \frac{F}{m},$$

т. е. при неизменной массе ускорение пропорционально силе, а при неизменной силе обратно пропорционально массе.

Закон, связывающий ускорение с массой тела и действующей на него силой, был открыт великим английским ученым Исааком Ньютоном (1643—1727) и носит его имя *).

---

*) Сам Ньютон указывает, что движение подчиняется трем законам. Тот закон, о котором сейчас идет речь, значится у Ньютона под номером вторым. Первым законом он называл закон инерции, а третьим — закон действия и противодействия.

Ускорение пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела и не зависит ни от каких других свойств тела. Из закона Ньютона следует, что именно масса является мерой «инертности» тела. При одинаковых силах труднее ускорить тело большей массы. Мы видим, что понятие массы, с которой мы ознакомились как со «скромной» величиной, определяемой взвешиванием на рычажных весах, приобрело новый глубокий смысл: масса характеризует динамические свойства тела.

Закон Ньютона мы можем записать так:

$$kF = ma,$$

где k — постоянный коэффициент. Этот коэффициент зависит от выбранных нами единиц.

Вместо того, чтобы пользоваться уже имевшейся у нас единицей силы (кгс), поступим иным образом. Как это часто стараются делать физики, подберем единицу силы так, чтобы коэффициент пропорциональности в законе Ньютона равнялся единице. Тогда закон Ньютона примет такой вид:

$$F = ma.$$

Как мы уже говорили, в физике принято измерять массу в граммах, путь — в сантиметрах и время — в секундах. Систему единиц, основанную на этих трех основных величинах, называют системой CGS (произносится «цеже-эс») или по-русски СГС.

Теперь подберем, пользуясь сформулированным выше принципом, единицу силы. Очевидно, сила равна единице в том случае, если она массе в 1 г придает ускорение, равное 1 см/с². Такая сила получила в этой системе название дины (дин).

Согласно закону Ньютона, $F=ma$, сила выражается в динах, если m граммов будет умножено на a см/с². Поэтому пользуются такой записью:

$$1 \text{ дин} = 1 \frac{\text{г} \cdot \text{см}}{\text{с}^2}.$$

Вес тела обозначается обычно буквой P. Сила P дает телу ускорение g, и, очевидно, в динах

$$P = mg.$$

Но у нас уже была единица силы — килограмм-сила (кгс). Связь между новой и старой единицей находим сразу же из последней формулы:

$$1 \text{ кгс} = 981\,000 \text{ дин}.$$

Дина — очень маленькая сила. Она равна примерно одному миллиграмму веса.

Мы упоминали уже о новой системе единиц (СИ), разработанной совсем недавно. Название для новой единицы силы ньютон (Н) вполне заслужено. При таком выборе единицы написание закона Ньютона будет наиболее простым, а определяют эту единицу так:

$$1\text{Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2},$$

т. е. 1 ньютон — это сила, которая сообщает массе в 1 кг ускорение 1 м/с^2.

Нетрудно связать эту новую единицу с диной и с килограмм-силой:

$$1 \text{ Н} = 100\,000 \text{ дин} = 0{,}102 \text{ кгс}.$$

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Такое движение возникает, согласно закону Ньютона, тогда, когда в сумме на тело действует постоянная сила, подгоняющая или тормозящая тело.

Хотя и не вполне точно, такие условия возникают довольно часто: тормозится под действием примерно постоянной силы трения автомашина, идущая с выключенным мотором, падает с высоты под действием постоянной силы тяжести увесистый предмет.

Зная результирующую силу, а также массу тела, мы найдем по формуле $a = F/m$ ускорение. Так как

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

где t — время движения, v — конечная, а v_0 — начальная скорость, то при помощи этой формулы можно ответить на ряд вопросов такого, например, характера: через сколько времени остановится поезд, если известна сила торможения, масса поезда и начальная скорость? До какой скорости разгонится автомашина, если известна сила мотора, сила сопротивления, масса машины и время разгона?

Часто нам бывает интересно знать длину пути, пройденного телом в равномерно-ускоренном движении. Если движение равномерное, то пройденный путь находится умножением скорости движения на время движения. Если движение равномерно-ускоренное, то подсчет величины пройденного пути производится так, как если бы тело двигалось то же время t равномерно со скоростью, равной полусумме начальной и конечной скоростей:

$$S = \frac{1}{2}(v_0 + v)\,t.$$

Итак, при равномерно-ускоренном (или замедленном) движении путь, пройденный телом, равен произведению полусуммы начальной и конечной скоростей на время движения. Такой же путь был бы пройден за то же время при равномерном движении со скоростью $\frac{1}{2}(v_0 + v)$. В этом смысле про $\frac{1}{2}(v_0 + v)$ можно сказать, что это средняя скорость равномерно-ускоренного движения.

Полезно составить формулу, которая показывала бы зависимость пройденного пути от ускорения. Подставляя $v = v_0 + at$ в последнюю формулу, находим:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

или, если движение происходит без начальной скорости,

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

Если за одну секунду тело прошло 5 м, то за две секунды оно пройдет (4×5) м, за три секунды — $(9 \times \times 5)$ м и т. д. Пройденный путь возрастает пропорционально квадрату времени.

По этому закону падает с высоты тяжелое тело. Ускорение при свободном падении равно g, и формула приобретает такой вид:

$$S=\frac{981}{2}\cdot t^2,$$

если t подставить в секундах, а g в сантиметрах на секунду в квадрате.

Если бы тело могло падать без помех каких-нибудь 100 с, то оно прошло бы с начала падения громадный путь — около 50 км. При этом за первые 10 с будет пройдено всего лишь 0,5 км — вот что значит ускоренное движение.

Но какую же скорость разовьет тело при падении с заданной высоты? Для ответа на этот вопрос нам понадобятся формулы, связывающие пройденный путь с ускорением и скоростью. Подставляя в $S=\frac{1}{2}(v_0+v)t$ значение времени движения $t=\frac{v-v_0}{a}$, получим:

$$S=\frac{1}{2a}(v^2-v_0^2),$$

или, если начальная скорость равна нулю,

$$S=\frac{v^2}{2a}, \quad v=\sqrt{2aS}.$$

Десять метров — это высота небольшого двух- или трехэтажного дома. Почему опасно прыгнуть на Землю с крыши такого дома? Простой расчет показывает, что скорость свободного падения достигнет значения $v=\sqrt{2\cdot 9{,}8\cdot 10}$ м/с $=14$ м/с ≈ 50 км/ч, а ведь это городская скорость автомашины.

Сопротивление воздуха не намного уменьшит эту скорость.

Выведенные нами формулы применяются для самых различных расчетов. Применим их, чтобы посмотреть, как происходит движение на Луне.

В романе Уэллса «Первые люди на Луне» рассказывается о неожиданностях, испытанных путешественниками в их фантастических прогулках. На Луне ускорение тяжести примерно в 6 раз меньше земного. Если на Земле падающее тело проходит за первую секунду 5 м, то на Луне оно «проплывет» вниз всего лишь 80 см (ускорение равно примерно 1,6 м/с²).

Написанные формулы позволяют быстро подсчитать лунные «чудеса».

Прыжок с высоты h длится время $t=\sqrt{2h/g}$. Так как лунное ускорение в 6 раз меньше земного, то на Луне для прыжка понадобится в $\sqrt{6}\approx 2{,}45$ раз больше времени. Во сколько же раз уменьшается конечная скорость прыжка $(v=\sqrt{2gh})$?

На Луне можно безопасно прыгнуть с крыши трехэтажного дома. В шесть раз возрастает высота прыжка, сделанного с той же начальной скоростью (формула $h=v^2/2g$). Прыжок, превышающий земной рекорд, будет под силу ребенку.

ПУТЬ ПУЛИ

Задача бросить предмет как можно дальше решается человеком с незапамятных времен. Камень, брошенный рукой или выпущенный из рогатки, стрела, вылетевшая из лука, ружейная пуля, артиллерийский снаряд, баллистическая ракета — вот краткий перечень успехов в этой области.

Брошенный предмет движется по кривой линии, называемой параболой. Ее можно построить без труда, если движение брошенного тела рассматривать как сумму двух движений — по горизонтали и по вертикали, происходящих одновременно и независимо. Ускорение свободного падения вертикально, поэтому летящая пуля движется по горизонтали по инерции с постоянной скоростью и одновременно по вертикали с постоянным ускорением падает на Землю. Как же сложить эти два движения?

Начнем с простого случая — начальная скорость горизонтальна (скажем, речь идет о выстреле из ружья, ствол которого горизонтален).

Возьмем лист миллиметровой бумаги и проведем вертикальную и горизонтальную линии (рис. 2.3). Так как оба движения происходят независимо, то через t секунд тело переместится на отрезок v_0t вправо и на отрезок $gt^2/2$ вниз. Отложим по горизонтали отрезок v_0t и из конца его — вертикальный отрезок $gt^2/2$. Конец вертикального отрезка укажет точку, в которой окажется тело через t секунд.

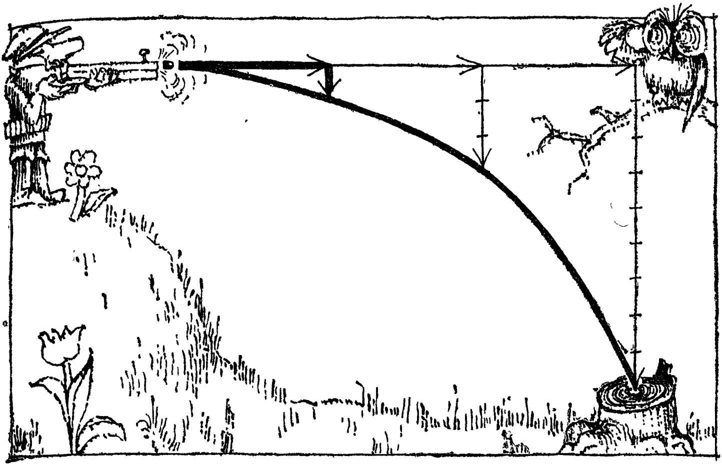


Рис. 2.3.

Это построение надо сделать для нескольких точек, т. е. для нескольких моментов времени. Через эти точки пройдет плавная кривая — парабола, изображающая траекторию тела. Чем чаще будут отложены точки, тем точнее будет построена траектория полета пули.

На рис. 2.4 построена тректория для случая, когда начальная скорость v_0 направлена под углом.

Вектор v_0 следует прежде всего разложить на вертикальную и горизонтальную составляющие. На горизонтальной линии будем откладывать $v_{гор}\,t$ — путь, на который сдвинется пуля вдоль горизонтали через t секунд.

Но пуля совершает одновременно движение вверх. Через t секунд она поднимется на высоту $h=v_{верт}\,t-gt^2/2$. По этой формуле, подставляя в нее интересующие нас моменты времени, надо рассчитать вертикальные смещения и отложить их на вертикальной оси. Сначала величины h будут возрастать (подъем), а затем убывать.

Теперь остается нанести на график точки траектории так же, как мы это сделали в предыдущем примере, и провести через них плавную кривую.

Если держать ствол ружья горизонтально, то пуля быстро зароется в землю; при вертикальном положении ствола она упадет на то место, откуда был произведен

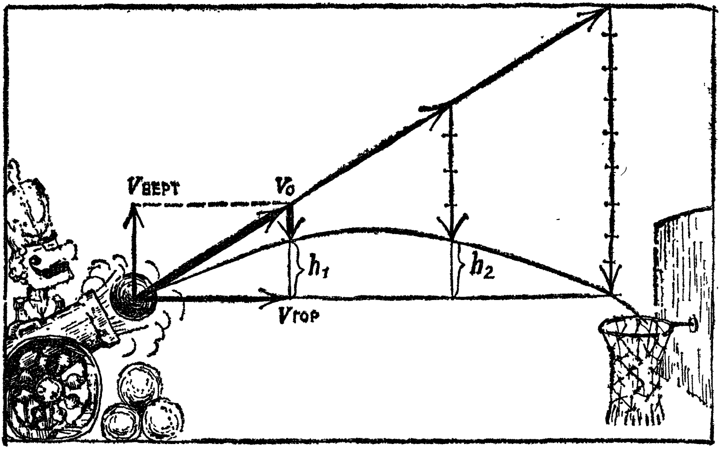


Рис. 2.4.

выстрел. Значит, чтобы стрелять как можно дальше, нужно ствол ружья установить под каким-то углом к горизонту. Но под каким?

Используем опять тот же прием — разложим вектор начальной скорости на две составляющие: по вертикали скорость равна v_1, а по горизонтали — v_2. Время от момента выстрела до момента достижения пулей наивысшей точки пути равно v_1/g. Обратим внимание на то, что столько же времени пуля будет падать вниз, т. е. полное время полета до падения пули на землю есть $2v_1/g$.

Так как движение по горизонтали равномерное, то дальность полета равна

$$S = 2v_1v_2/g$$

(при этом мы пренебрегли высотой ружья над уровнем земли).

Мы получили формулу, которая показывает, что дальность полета пропорциональна произведению составляющих скорости. При каком же направлении выстрела это произведение будет наибольшим? На этот вопрос ответит все то же геометрическое правило сложения векторов. Скорости v_1 и v_2 образуют прямоугольник скоростей; диагональю в нем служит полная скорость v. Произведение $v_1 v_2$ равно площади этого прямоугольника.

Наш вопрос сводится к следующему: при заданной длине диагонали какие надо взять стороны, чтобы площадь прямоугольника была наибольшей? В геометрии доказывается, что этому условию удовлетворяет квадрат. Значит, дальность полета пули будет наибольшей, когда $v_1 = v_2$, т. е. тогда, когда прямоугольник скоростей обращается в квадрат. Диагональ квадрата скоростей образует с горизонталью угол в 45° — под таким углом и надо держать ружье, чтобы пуля летела как можно дальше.

Если v — полная скорость пули, то в случае квадрата $v_1 = v_2 = v/\sqrt{2}$. Формула дальности полета для этого лучшего случая выглядит так: $S = v^2/g$, т. е. дальность будет вдвое больше, чем высота подъема при выстреле вверх с той же начальной скоростью.

Высота подъема при выстреле под углом в 45° будет $h = v_1^2/2g = v^2/4g$, т. е. в четыре раза меньше дальности полета.

Надо признаться, что формулы, которыми мы оперировали, дают точные результаты лишь в случае, довольно далеком от практики,— при отсутствии воздуха. Сопротивление воздуха во многих случаях играет решающую роль и в корне меняет всю картину.

ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Если точка движется по окружности, то движение является ускоренным, уже хотя бы потому, что в каждый момент времени скорость меняет свое направление. По своему числовому значению скорость может оставаться неизменной, и мы остановим внимание именно на подобном случае.

Будем рисовать векторы скорости в последовательные промежутки времени, помещая начала векторов в одну точку. (Мы имеем на это право.) Если вектор скорости повернулся на небольшой угол, то изменение скорости, как мы знаем, изобразится основанием равнобедренного треугольника. Построим изменения скорости за время полного оборота тела (рис. 2.5). Сумма изменений скорости за время полного оборота будет

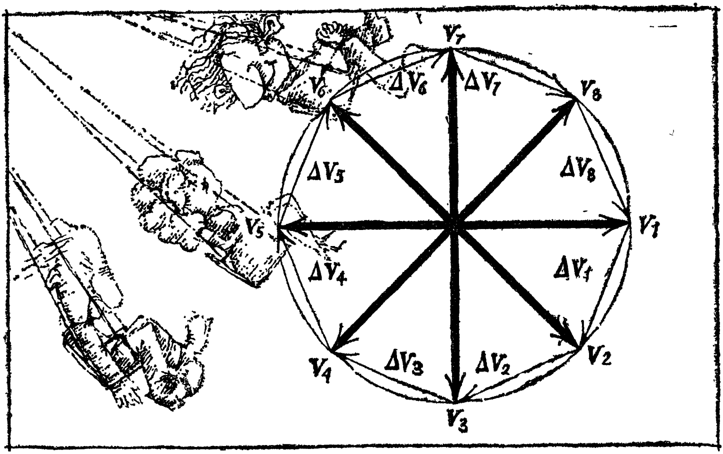


Рис. 2.5.

равна сумме сторон изображенного многоугольника. Строя каждый треугольничек, мы молчаливо предполагали, что вектор скорости изменился скачком, на самом же деле направление вектора скорости меняется непрерывно. Совершенно ясно, что ошибка будет тем меньше, чем меньше мы будем брать угол треугольничка. Чем меньше стороны многоугольника, тем он теснее прижимается к окружности радиуса v. Поэтому точным значением суммы абсолютных величин изменений скорости за время оборота точки будет длина окружности $2\pi v$. Ускорение найдется делением ее на время полного оборота T : $a=2\pi v/T$.

Но время полного оборота при движении по окружности радиуса R может быть записано в виде $T=2\pi R/v$. Подставив это выражение в предыдущую формулу, получим для ускорения: $a=v^2/R$.

При неизменном радиусе вращения ускорение пропорционально квадрату скорости. При данной скорости ускорение обратно пропорционально радиусу.

Это же рассуждение показывает нам, как направлено в каждое данное мгновение ускорение кругового движения. Чем меньше угол при вершине равнобедренных треугольников, которые мы использовали для доказательства, тем ближе к 90° угол между приростом скорости и скоростью.

Значит, ускорение равномерного кругового движения направлено перпендикулярно к скорости; а как же скорость и ускорение направлены по отношению к траектории? Поскольку скорость есть касательная к пути, то ускорение направлено по радиусу и притом к центру окружности. Эти соотношения хорошо видны на рис. 2.6.

Попробуйте покрутить камень на веревке. Вы отчетливо ощутите необходимость для этого мускульного усилия. Зачем же нужна сила? Ведь тело движется равномерно? Вот в том-то и дело, что нет. Тело движется с неизменной по величине скоростью, но непрерывное изменение направления скорости делает это движение ускоренным. Сила необходима для того, чтобы отклонить тело от инерциального прямого пути. Сила нужна для того, чтобы создать то ускорение v^2/R, которое мы только что вычислили.

Согласно закону Ньютона, куда направлено ускорение, туда «смотрит» и сила. Значит, тело, вращающееся по окружности с неизменной скоростью, должно находиться под действием силы, направленной по радиусу к центру вращения. Сила действующая на камень со стороны веревки, называется центростремительной; она и обеспечивает ускорение v^2/R. Следовательно, эта сила есть mv^2/R.

Веревка тянет камень, камень тянет веревку. Мы узнаем в этих двух силах «предмет и его изображение в зеркале» — силы действия и противодействия. Часто силу, с которой камень действует на веревку, называют центробежной. Центробежная сила равна, разумеется, mv^2/R и направлена по радиусу от центра

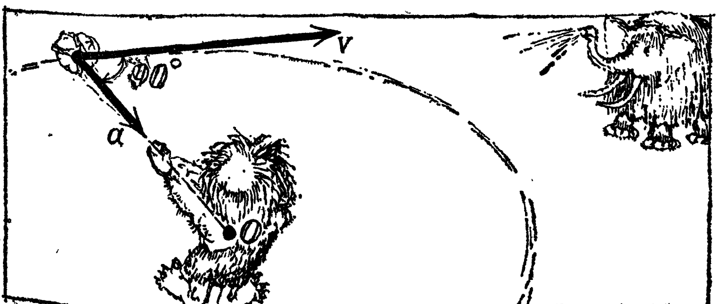


Рис. 2.6.

вращения. Центробежная сила приложена к тому телу, которое противодействует инерциальному стремлению вращающегося тела двигаться прямолинейно.

Сказанное относится и к случаю, когда роль «веревки» играет сила тяжести. Луна вращается вокруг Земли. Что удерживает нашего спутника? Почему, следуя закону инерции, он не уходит в межпланетное путешествие? Земля держит Луну «невидимой веревкой» — силой притяжения. Эта сила равна mv^2/R, где v — скорость движения по лунной орбите, а R — расстояние до Луны. Центробежная сила приложена в этом случае к Земле, но благодаря большой массе Земли она лишь незначительно влияет на характер движения нашей планеты.

Положим, что требуется вывести искусственный спутник Земли на круговую орбиту на расстоянии 300 км от земной поверхности. Какова должна быть скорость такого спутника? На расстоянии 300 км ускорение свободного падения немного меньше, чем на поверхности Земли, и равно 8,9 м/с². Ускорение движущегося по окружности спутника равно v^2/R, где R — расстояние от центра вращения (т. е. от центра Земли) — примерно равно 6600 км$=6{,}6\cdot10^6$ м. С другой стороны, это ускорение равно ускорению свободного падения g. Следовательно, $g=v^2/R$, откуда находим скорость движения спутника по орбите:

$$v=\sqrt{gR}=\sqrt{8{,}9\cdot6{,}6\cdot10^6}=7700 \text{ м/с}=7{,}7 \text{ км/с}.$$

Минимальная скорость, необходимая для того, чтобы горизонтально брошенное тело стало спутником Земли, называется первой космической скоростью. Из приведенного примера видно, что эта скорость близка к 8 км/с.

ЖИЗНЬ БЕЗ ВЕСА

Выше мы отыскали «разумную точку зрения» на движение. Правда, «разумных» точек зрения, которые мы назвали инерциальными системами, оказалось бесконечное множество.

Теперь, вооруженные знанием законов движения, мы можем поинтересоваться, как выглядит движение с «не-разумных» точек зрения. Интерес к тому, как живется жителям неинерциальных систем, вовсе не праздный, хотя бы уже потому, что мы сами являемся обитателями такой системы.

Представим себе, что мы, захватив измерительные приборы, погрузились на межпланетный корабль и отправились путешествовать в мир звезд.

Быстро бежит время. Солнце уже стало похоже на маленькую звездочку. Двигатель выключен, корабль далеко от притягивающих тел.

Посмотрим теперь, что делается в нашей летающей лаборатории. Почему висит в воздухе и не падает на пол сорвавшийся с гвоздика термометр? В каком странном положении застыл отклонившийся от «вертикали» маятник, висящий на стене. Мы тут же находим разгадку: ведь корабль не на Земле, а в межпланетном пространстве. Предметы потеряли вес.

Полюбовавшись на необычную картину, мы решаем изменить курс. Нажатием кнопки включаем реактивный двигатель, и вдруг... предметы, окружающие нас, словно ожили. Все тела, которые не были наглухо закреплены, пришли в движение. Термометр упал, маятник начал качаться и, постепенно успокаиваясь пришел в вертикальное положение, подушка послушно прогнулась под лежащим на ней чемоданом. Посмотрим на приборы, которые указывают, в какую сторону наш корабль начал ускоренное движение. Конечно, оно направлено вверх. Приборы показывают, что мы выбрали движение с небольшим для возможностей корабля ускорением 9,8 м/с^2. Наши ощущения вполне обычны, мы чувствуем себя, как на Земле. Но почему так? По-прежнему невообразимо далеко находится корабль от притягивающих масс, нет сил притяжения, а предметы приобрели вес.

Выпустим из рук шарик и измерим, с каким ускорением он падает на пол корабля. Оказывается, ускорение равно 9,8 м/с^2. Эту цифру мы только что прочли на приборах, измеряющих ускорение ракеты. Корабль движется с таким же ускорением вверх, с каким тела в нашей летучей лаборатории падают вниз.

Но что такое «верх» и «низ» в летящем корабле? Как просто дело обстояло, когда мы жили на Земле. Там небо было верхом, Земля была низом. А здесь? У нашего верха есть неоспоримый признак — это направление ускорения ракеты.

Смысл наших наблюдений понять нетрудно: на шарик, выпущенный из рук, никакие силы не действуют. Шарик движется по инерции. Это ракета движется с ускорением по отношению к шарику, и нам, находящимся в ракете, кажется, что шарик «падает» в сторону, обратную направлению ускорения ракеты. Разумеется, ускорение этого «падения» равно истинному ускорению ракеты. Ясно также, что все тела в ракете будут «падать» с одинаковым ускорением.

Из всего сказанного мы можем сделать интересный вывод. В ускоренно движущейся ракете тела начинают «весить». При этом «сила притяжения» направлена в сторону, противоположную направлению ускорения ракеты, а ускорение свободного «падения» равно ускорению движения реактивного корабля. И самое замечательное то, что практически мы не можем отличить ускоренное движение системы от соответствующей силы тяжести *). Находясь в космическом корабле с закрытыми окнами, мы не могли бы узнать, покоится ли он на Земле или движется с ускорением 9,8 м/с^2. Равноценность ускорения и действия силы тяжести называется в физике принципом эквивалентности.

Этот принцип, как мы сейчас увидим на множестве примеров, позволяет быстро решать многие задачи, добавляя к реальным силам фиктивную силу тяжести, существующую в ускоренно движущихся системах.

Первым примером может служить лифт. Захватим с собой пружинные весы с гирями и отправимся на лифте вверх. Следим за поведением стрелки весов, на которые положен килограмм продуктов (рис. 2.7). Подъем начался; мы видим, что показания весов возросли, как будто гиря стала весить больше килограмма. Принципом эквивалентности легко объяснить этот факт. Во время движения лифта вверх с ускорением a возни-

*) Только практически. В принципе различие есть. На Земле силы тяжести направлены по радиусам к центру Земли. Это значит, что направления ускорения в двух разных точках образуют между собой угол. В ракете, движущейся с ускорением, направления тяжести во всех точках строго параллельны. На Земле ускорение меняется также с высотой; в ускоренно движущейся ракете этого эффекта нет.

кает дополнительная сила тяжести, направленная вниз. Так как ускорение этой силы равно a, то дополнительный вес равен ma. Значит, весы покажут вес $mg+ma$. Ускорение кончилось, и лифт движется равномерно — пружина вернулась в исходное положение и показывает 1 кг. Приближаемся к верхнему этажу, движение лифта замедляется. Что будет теперь с пружиной весов? Ну, конечно, теперь груз весит меньше одного килограмма. При замедлении движения лифта вектор ускорения смотрит вниз. Значит, дополнительная, фиктивная сила тяжести направлена вверх, в сторону, противоположную направлению земного тяготения. Теперь a отрицательно, и весы показывают величину, меньшую mg. После остановки лифта пружина возвращается в исходное положение. Начнем спуск. Движение лифта ускоряется; вектор ускорения направлен вниз, значит, дополнительная сила тяжести направлена вверх. Сейчас груз весит меньше килограмма. Когда движение станет равномерным, дополнительная тяжесть пропадет, и перед окончанием нашего путешествия на лифте — при замедленном движении вниз — груз будет весить больше килограмма.

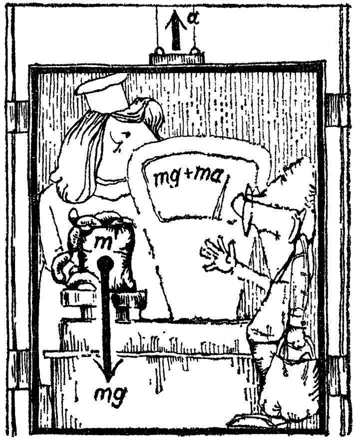


Рис. 2.7.

Неприятные ощущения, испытываемые при быстром ускорении и замедлении движения лифта, связаны с рассмотренным изменением веса.

Если лифт падает с ускорением, то тела, находящиеся в нем, становятся как бы легче. Чем больше это ускорение, тем больше потеря веса. Что же произойдет при свободном падении системы? Ответ ясен: в этом случае тела перестанут давить на подставку — перестанут весить: сила притяжения Земли будет уравновешиваться дополнительной силой тяжести, существующей в такой свободно падающей системе. Находясь в таком «лифте», можно спокойно положить на плечи тонну груза.

В начале этого параграфа мы описывали жизнь без веса в межпланетном корабле, вышедшем за пределы сферы тяготения. При равномерном и прямолинейном движении в таком корабле веса нет, но то же самое происходит и при свободном падении системы. Значит, нет нужны выходить за пределы сферы тяготения: веса нет во всяком межпланетном корабле, который движется с выключенным двигателем. Свободное падение приводит к потере веса в подобных системах. Принцип эквивалентности привел нас к выводу о почти (см. примечание на стр. 60) полной равноценности системы отсчета, движущейся прямолинейно и равномерно вдали от действия сил притяжения, и системы отсчета, свободно падающей под действием тяжести. В первой системе веса нет, а во второй «вес книзу» уравновешивается «весом кверху». Никакой разницы между системами мы не найдем.

В искусственном спутнике Земли жизнь без веса наступает с того момента, когда корабль выведен на орбиту и начинает свое движение без действия ракеты.

Первым межпланетным путешественником была собака Лайка, а вскоре и человек освоился с жизнью без веса в кабине космического корабля. Первым на этом пути был советский летчик-космонавт Ю. А. Гагарин.

Нельзя назвать жизнь в кабине корабля обычной. Много изобретательности и выдумки понадобилось, чтобы сделать послушными вещи, столь легко подчиняющиеся силе тяжести. Можно ли, например, налить воды из бутылки в стакан? Ведь вода льется «вниз» под действием тяжести. Можно ли готовить пищу, если нельзя нагреть на плитке воду? (Теплая вода не будет перемешиваться с холодной.) Как писать карандашом по бумаге, если легкого толчка карандаша о стол достаточно, чтобы откинуть пишущего в сторону? Ни спичка, ни свеча, ни газовая горелка гореть не будут, так как сгоревшие газы не будут подниматься вверх (ведь верха-то нет!) и не дадут доступа кислороду. Пришлось подумать даже о том, как обеспечить нормальное протекание естественных процессов, происходящих в организме человека,— ведь эти процессы «привыкли» к силе земного тяготения.

ДВИЖЕНИЕ С «НЕРАЗУМНОЙ» ТОЧКИ ЗРЕНИЯ

Теперь займемся физическими наблюдениями в ускоренно движущемся автобусе или трамвае. Особенность этого примера, отличающая его от предыдущего, состоит в следующем. В примере с лифтом дополнительная тяжесть и притяжение Землей были направлены вдоль одной линии. В тормозящем или набирающем скорость трамвае дополнительная сила тяжести направлена под прямым углом к земному притяжению. Это вызывает своеобразные, хотя и привычные, ощущения у пассажира. Если трамвай набирает скорость, то возникает дополнительная сила, направленная в сторону, обратную направлению движения. Сложим эту силу с силой земного притяжения. В сумме на человека, находящегося в вагоне, будет действовать сила, направленная под тупым углом к направлению движения. Находясь в вагоне, как обычно, лицом к движению, мы ощутим, что наш «верх» переместился. Чтобы не упасть, мы захотим стать «вертикально» — так, как показано на рис. 2.8, *а*. Наша «вертикаль» косая. Она наклонена под острым углом к направлению движения. Если же человек будет стоять под прямым углом к движению, не держась ни за что, он обязательно упадет назад.

Наконец, движения трамвая стало равномерным, и мы можем стоять спокойно. Однако приближается новая остановка. Вагоновожатый тормозит и ... наша «вертикаль» отклоняется. Теперь она направлена, как видно из построения на рис. 2.8, *б*, под тупым углом к движению. Чтобы не упасть, пассажир отклоняется назад. Однако в таком положении он остается недолго. Вагон останавливается, замедление исчезает, и «вертикаль» теперь направлена под прямым углом к Земле. Приходится опять менять положение тела. Проверьте ваши ощущения. Не правда ли, в момент начала торможения кажется, что вас толкнули в спину, а когда вагон остановился, вы испытываете ощущение толчка в грудь.

Похожие явления происходят и при движении трамвая по закруглению. Мы знаем, что движение по окружности даже с неизменной по величине скоростью является ускоренным. Ускорение v^2/R будет тем больше,

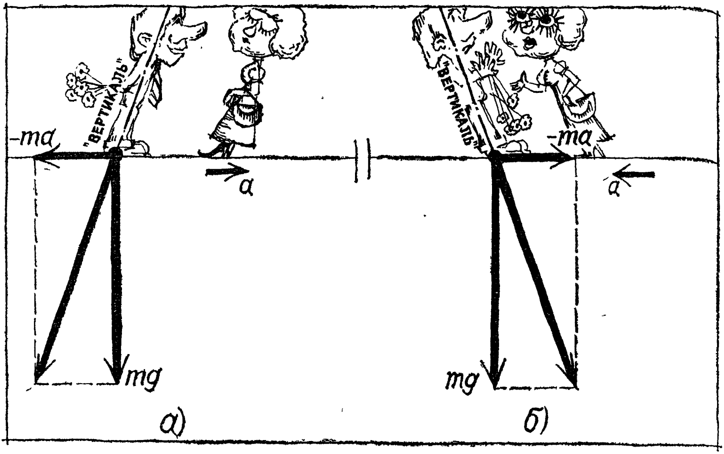


Рис. 2.8.

чем быстрее движется трамвай и чем меньше радиус закругления R. Ускорение этого движения направлено по радиусу к центру. Но это эквивалентно возникновению дополнительной тяжести, направленной от центра. Значит, на пассажира трамвая во время поворота будет действовать дополнительная сила mv^2/R, отбрасывающая его во внешнюю сторону закругления. Радиальная сила mv^2/R называется центробежной. С этой же силой, рассмотренной, правда, с несколько иной точки зрения, мы встречались уже раньше, на стр. 57.

Действие центробежной силы в поворачивающем трамвае или автобусе может привести лишь к небольшим неприятностям. Сила mv^2/R в этом случае невелика. Однако при быстром движении на закруглении центробежные силы могут достигнуть больших величин и стать опасными для жизни. С большими значениями mv^2/R сталкиваются летчики, когда самолет совершает так называемую мертвую петлю. Когда самолет описывает окружность, на летчика действует центробежная сила, прижимающая его к сидению. Чем меньше окружность петли, тем больше дополнительная тяжесть, с которой прижимается к сидению летчик. Если эта тяжесть велика, человек может «порваться» — ведь ткани живого организма обладают ограниченной прочностью, они не могут выдержать любую тяжесть.

Насколько же может «потяжелеть» человек без существенной опасности для жизни? Это зависит от длительности нагрузки. Если она продолжается доли секунды, то человек способен выдержать восьми-десятикратный вес, т. е. перегрузку на 7—9 g. В продолжение десяти секунд летчик может выдержать перегрузку на 3—5 g. Космонавтов интересует вопрос о перегрузке, которую человек способен выносить десятки минут, а может быть, и часы. В таких случаях перегрузка, вероятно, должна быть гораздо меньше.

Вычислим радиусы петель, которые самолет может описать без опасности для летчика, на различных скоростях. Произведем расчет для ускорения, равного $v^2/R=4g$ и $R=v^2/4g$. При скорости 360 км/ч=100 м/с радиус петли будет 250 м; если же скорость будет в 4 раза больше, т. е. 1440 км/ч (а эти скорости уже превзойдены современными реактивными самолетами), радиус петли должен быть увеличен в 16 раз. Минимальный радиус петли становится равным 4 км.

Не оставим без внимания и более скромный вид транспорта — велосипед. Все видели, как наклоняется велосипедист при повороте. Предложим велосипедисту описывать окружность радиуса R со скоростью v, т. е. двигаться с ускорением v^2/R, направленным к центру. Тогда, кроме силы земного притяжения, на велосипедиста будет действовать дополнительная, центробежная сила, направленная по горизонтали от центра окружности. На рис. 2.9 показаны эти силы и их сумма. Ясно, что велосипедист должен держаться «вертикально», иначе он упадет. Но... его вертикаль не совпадает с земной. Из рисунка видно, что векторы mv^2/R и mg — катеты прямоугольного треугольника. Отношение катета, противолежащего углу α, к прилежащему называется в тригонометрии тангенсом угла α. У нас $\operatorname{tg}\alpha=v^2/Rg$; масса сократилась в полном согласии с принципом эквивалентности. Значит, угол наклона велосипедиста не зависит от его массы — и толстому седоку и худому надо наклоняться одинаково. Формула и изображенный на рисунке треугольник показывают зависимость наклона от скорости движения (возрастает с увеличением) и от радиуса окружности (возрастает с уменьшением). Мы выяснили, что вертикаль велосипедиста не совпадает с земной вертикалью. Что же он

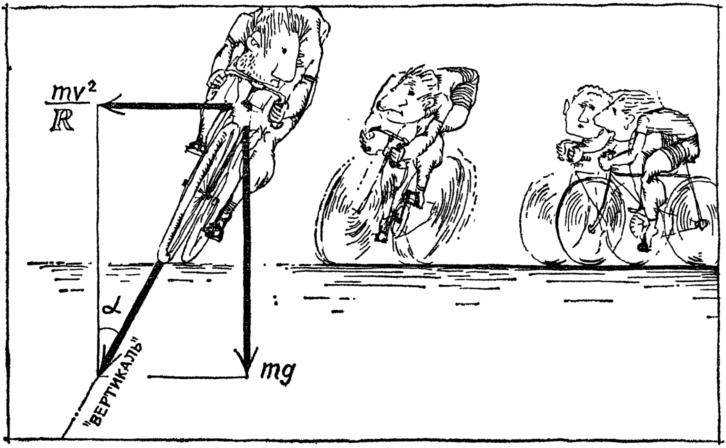


Рис. 2.9.

будет чувствовать? Придется рис. 2.9 повернуть. Дорога теперь выглядит как склон горы (рис. 2.10, *а*), и нам становится ясным, что при недостаточной силе трения между шинами и дорожным покрытием (влажный асфальт) велосипед может соскользнуть, и крутой поворот закончится падением в кювет.

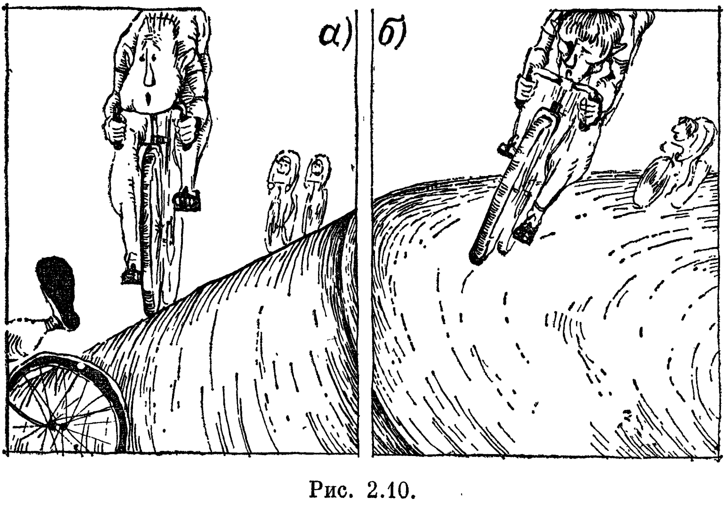


Рис. 2.10.

Для того чтобы этого не произошло, на крутых поворотах (или, как говорят, виражах) шоссе делают наклонным, т. е. горизонтальным для велосипедиста — так, как на рис. 2.10, *б*. Таким способом можно сильно уменьшить, а то и вовсе уничтожить стремление к соскальзыванию. Именно так устроены повороты на велосипедных треках и автострадах.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СИЛЫ

Теперь займемся вращающимися системами. Движение такой системы определяется числом оборотов в секунду, которое совершает эта система, поворачиваясь вокруг оси. Надо, конечно, знать и направление оси вращения.

Чтобы лучше понять особенности жизни во вращающихся системах, рассмотрим «колесо смеха» — известный аттракцион. Устройство его очень несложно. Гладкий диск диаметром в несколько метров быстро вращается. Желающим предлагается сесть на него и попробовать удержаться. Даже люди, не знающие физики, быстро постигают секрет успеха: надо устроиться в центре диска, так как чем дальше от центра, тем труднее удержаться.

Такой диск представляет собой неинерциальную систему с некоторыми особыми свойствами. Каждый предмет, скрепленный с диском, движется по окружности радиуса R со скоростью v, т. е. с ускорением v^2/R. Как мы уже знаем, с точки зрения неинерциального наблюдателя это означает наличие дополнительной тяжести mv^2/R, направленной по радиусу от центра. В любой точке «чертова колеса» будет действовать эта радиальная сила тяжести, в любой точке она будет создавать радиальное ускорение v^2/R. Для точек, лежащих на одной окружности, величина этого ускорения будет одинаковой. А на разных окружностях? Не торопитесь сказать, что ускорение, согласно формуле v^2/R, будет тем больше, чем меньше расстояние от центра. Это неверно; ведь скорость более удаленных от центра точек колеса будет больше. Действительно, если обозначить буквой n число оборотов, совершаемых колесом в секунду, то путь, проходимый точкой колеса, находящейся на расстоянии R от центра, за одну секунду, т. е. скорость этой точки, можно выразить так: $2\pi Rn$.

Скорость точки прямо пропорциональна ее расстоянию от центра. Теперь формулу ускорения можно переписать:

$$a = 4\pi^2 n^2 R.$$

А так как число оборотов, совершаемых в секунду, одинаково для всех точек колеса, то мы приходим к результату: ускорение силы «радиальной тяжести», действующей на вращающемся колесе, возрастает пропорционально расстоянию точки от центра колеса.

В этой интересной неинерциальной системе сила тяжести на разных окружностях разная. Значит, и направления «вертикалей» для тел, находящихся на разных расстояниях от центра, будут разные. Сила притяжения Землей, разумеется, одна и та же во всех точках колеса. А вектор, характеризующий дополнительную радиальную тяжесть, становится длиннее по мере удаления от центра. Значит, диагонали прямоугольников отклоняются все больше и больше от земной вертикали.

Если представить последовательные ощущения человека, соскальзывающего с «колеса смеха», придерживаясь его точки зрения, то можно сказать, что по мере удаления от центра диск «наклоняется» все больше и больше и удержаться на нем становится невозможно. Чтобы удержаться на диске, надо стараться поместить свой центр тяжести на «вертикаль», которая тем больше наклонена к оси вращения, чем дальше от нее находятся фигурки человека, нарисованные на рис. 2.11.

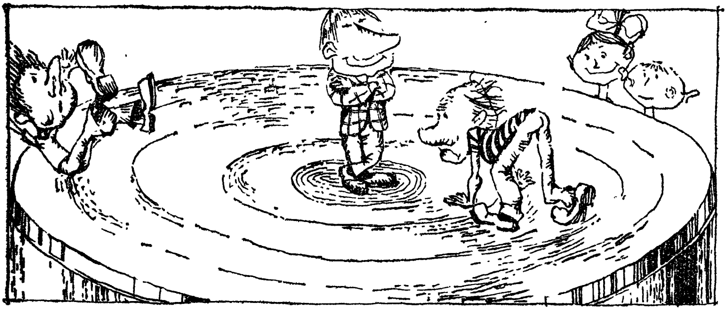


Рис. 2.11.

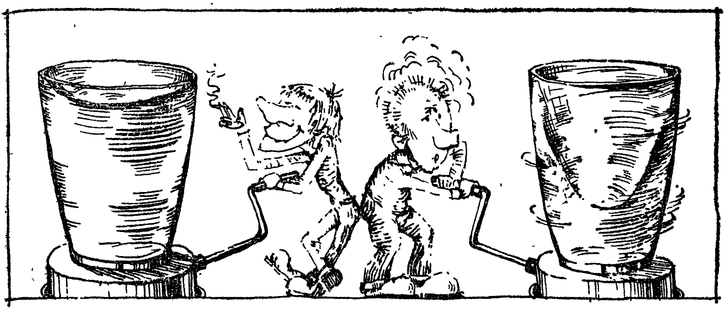


Рис. 2.12.

Однако нельзя ли придумать для этой инерциальной системы устройство, похожее на наклонное шоссе? Конечно, можно, но придется заменить диск такой поверхностью, чтобы в каждой ее точке полная сила тяжести была перпендикулярна к поверхности. Форму такой поверхности можно рассчитать. Она называется параболоидом. Название это не случайно: в каждом своем вертикальном сечении параболоид дает параболу — кривую, по которой падают тела. Параболоид возникает при вращении параболы вокруг ее оси.

Очень легко создать такую поверхность, если привести в быстрое вращение сосуд с водой. Поверхность вращающейся жидкости и есть параболоид. Частицы воды перестанут перемещаться как раз тогда, когда сила, прижимающая каждую частицу к поверхности, будет перпендикулярна к поверхности. Каждой скорости вращения соответствует свой параболоид (рис. 2.12).

Если изготовить твердый параболоид, то можно наглядно показать его свойство. Маленький шарик, помещенный в любой точке вращающегося с определенной скоростью параболоида, останется в покое. Это значит, что действующая на него сила будет перпендикулярна к поверхности. Иначе говоря, поверхность вращающегося параболоида обладает как бы свойствами горизонтальной поверхности. По такой поверхности можно ходить, как по земле, и чувствовать себя при этом вполне устойчиво. Однако при ходьбе направление вертикали будет изменяться.

Центробежные явления широко используются в технике. На использовании этих явлений основано, например, устройство центрифуги.

Центрифуга представляет собой барабан, быстро вращающийся вокруг своей оси. Что будет, если в такой барабан, наполненный до краев водой, бросать разные предметы?

Опустим в воду металлический шарик — он пойдет ко дну, но не по нашей вертикали, а все время удаляясь от оси вращения и остановится у стенки. Теперь бросим в барабан пробковый шарик — он, наоборот, сразу начнет движение по направлению к оси вращения и там расположится.

Если барабан этой модели центрифуги большого диаметра, то мы заметим, что ускорение резко нарастает по мере отдаления от центра.

Происходящие явления нам вполне понятны. Внутри центрифуги имеется дополнительная радиальная тяжесть. Если центрифуга вращается достаточно быстро, то ее «низ» — это стенки барабана. Металлический шарик «погружается» в воду, а пробковый «всплывает». Чем дальше от оси вращения, тем «тяжелее» становится «падающее» в воду тело.

В достаточно совершенных центрифугах скорость вращения доводится до 60 000 оборотов в минуту, т. е. 10^3 оборотов в секунду. На расстоянии 10 см от оси вращения ускорение радиальной силы тяжести будет равно примерно

$$40 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 = 4 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2,$$

т. е. в 400 000 раз больше земного ускорения.

Ясно, что земную тяжесть для таких машин можно не учитывать, мы действительно вправе считать, что «низ» в центрифуге — это стенки барабана.

Из сказанного становятся понятными области применения центрифуги. Если мы хотим отделить в смеси тяжелые частицы от легких, всегда целесообразно применение центрифуги. Всем известно выражение: «мутная жидкость отстоялась». Если грязная вода постоит достаточно долго, то муть (обычно более тяжелая, чем вода) осядет на дно. Однако процесс оседания может продолжаться месяцами, а при помощи хорошей центрифуги можно очистить воду мгновенно.

Центрифуги, вращающиеся со скоростью в десятки тысяч оборотов в минуту, способны выделять тончайшую муть не только из воды, но и из вязких жидкостей.

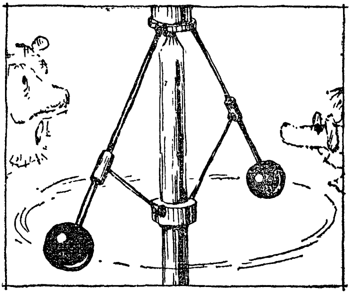


Рис. 2.13.

Центрифуги применяются в химической промышленности для отделения кристаллов от раствора, из которого они выросли, для обезвоживания солей, для очистки лаков; в пищевой промышленности — для разделения патоки и сахарного песка.

Центрифуги, применяемые для отделения от большого количества жидкости твердых или жидких включений, называют сепараторами. Главное их применение — обработка молока. Молочные сепараторы вращаются со скоростью 2—6 тысяч оборотов в минуту, диаметр их барабана доходит до 5 м.

В металлургии широко применяется центробежное литье. Уже при скоростях 300—500 оборотов в минуту жидкий металл, поступающий во вращающуюся форму, со значительной силой прижимается к внешним стенкам формы. Так отливают металлические трубы, которые при этом получаются более плотные, более однородные, без раковин и трещин.

Вот и другое применение центробежной силы. На рис. 2.13 изображено простое устройство, служащее для регулировки числа оборотов вращающихся частей машины. Это устройство называется центробежным регулятором. При увеличении скорости вращения возрастает центробежная сила, шарики регулятора отходят дальше от оси. Тяги, скрепленные с шариками, отклоняются и при определенном рассчитанном инженером отклонении могут разомкнуть какие-либо электрические контакты, а в паровой машине, например, могут открыть клапаны, выпускающие излишек пара. При этом скорость вращения уменьшится и тяги займут нормальное положение.

Интересен такой опыт. На ось электрического мотора наденем картонный кружок. Включим ток и поднесем к вращающемуся кружку кусок дерева. Брусок изрядной толщины перепиливается пополам так же легко, как и стальной пилой.

Попытка распилить дерево картонкой, если ею действовать как ручной пилой, может вызвать только улыбку. Почему же вращающийся картон разрезает дерево? На частички картона, расположенные на окружности, действует громадная центробежная сила. Боковые силы, которые могли бы исказить плоскость картонки, ничтожны по сравнению с центробежными. Сохраняя свою плоскость неизменной, картонный круг и получает возможность вгрызаться в дерево.

Центробежная сила, возникающая благодаря вращению Земли, приводит к различиям в весе тела на разных широтах, о чем говорилось выше.

На экваторе тело весит меньше, чем на полюсе, по двум причинам. Тела, лежащие на поверхности Земли, находятся на разных расстояниях от земной оси в зависимости от широты местности. Разумеется, при переходе от полюса к экватору это расстояние возрастает. Кроме того, на полюсе тело находится на оси вращения, и центробежное ускорение

$$a=4\pi^2n^2R=0$$

(расстояние от оси вращения $R=0$). Напротив, на экваторе это ускорение максимально. Центробежная сила уменьшает силу притяжения. Поэтому на экваторе давление тела на подставку (вес тела) наименьшее.

Если бы Земля имела точно шарообразную форму, то килограммовая гиря, перенесенная с полюса на экватор, теряла бы в весе 3,5 грамма. Вы легко найдете эту цифру по формуле

$$4\pi^2n^2Rm,$$

подставив $n=1$ об/сут., $R=6300$ км и $m=1000$ г. Не забудьте только привести единицы измерения к секундам и сантиметрам.

Однако на самом деле килограммовая гиря теряет в весе не 3,5, а 5,3 грамма. Это происходит из-за того, что Земля представляет собой сплюснутый шар, называемый в геометрии эллипсоидом. Расстояние от полюса до центра Земли меньше земного радиуса, выходящего на экваторе, примерно на 1/300 его часть.

Это сжатие земного шара имеет своей причиной ту же центробежную силу. Ведь она действует на все частички Земли. В далекие времена центробежная сила «сформировала» нашу планету — придала ей сплюснутую форму.

СИЛЫ КОРИОЛИСА

Своеобразие мира вращающихся систем не исчерпывается существованием радиальных сил тяжести. Познакомимся с еще одним интересным эффектом, теория которого была дана в 1835 г. французом Кориолисом.

Поставим перед собой такой вопрос: как выглядит прямолинейное движение с точки зрения вращающейся лаборатории? План такой лаборатории изображен на рис. 2.14. Чертой, проходящей через центр, показана прямолинейная траектория какого-то тела. Мы рассматриваем тот случай, когда путь тела проходит через центр вращения нашей лаборатории. Диск, на котором размещена лаборатория, вращается равномерно; на рисунке показаны пять положений лаборатории по отношению к прямолинейной траектории. Так выглядит взаимное положение лаборатории и траектории тела через одну, две, три и т. д. секунды. Лаборатория, как вы видите, вращается против часовой стрелки, если смотреть на нее сверху.

На линии пути нанесены стрелки, соответствующие отрезкам, которые тело проходит за одну, две, три и т. д. секунды. За каждую секунду тело проходит одинаковый

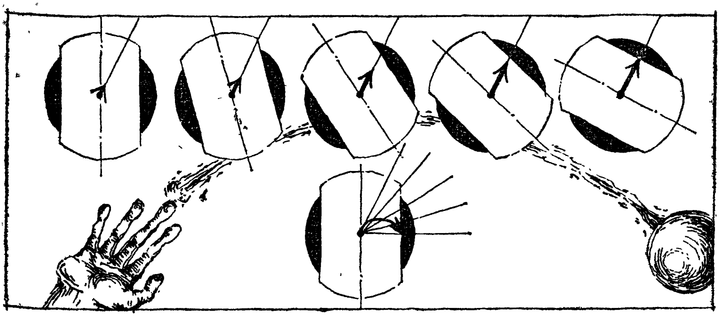


Рис. 2.14.

путь, так как речь идет о равномерном и прямолинейном движении (с точки зрения неподвижного наблюдателя).

Представьте себе, что движущееся тело — это свежевыкрашенный катящийся по диску шар. Какой след останется на диске? Наше построение дает ответ на этот вопрос. Отмеченные окончаниями стрелок точки с пяти рисунков перенесены на один чертеж. Остается соединить эти точки плавной кривой. Результат построения нас не удивит: прямолинейное и равномерное движение выглядит с точки зрения вращающегося наблюдателя криволинейным. Обращает на себя внимание такое правило: движущееся тело отклоняется на всем пути вправо по ходу движения. Предположим, что диск вращается по часовой стрелке, и предоставим читателю повторить построение. Оно покажет, что в этом случае движущееся тело с точки зрения вращающегося наблюдателя отклоняется влево по ходу движения.

Мы знаем, что во вращающихся системах появляется центробежная сила. Однако ее действие не может служить причиной искривления пути — ведь она направлена вдоль радиуса. Значит, во вращающихся системах кроме центробежной силы возникает еще дополнительная сила. Ее называют силой Кориолиса.

Почему же в предшествующих примерах мы не сталкивались с силой Кориолиса и превосходно обходились одной центробежной? Причина в том, что мы до сих пор не рассматривали движение тел с точки зрения вращающегося наблюдателя. А сила Кориолиса появляется только в этом случае. На тела, которые покоятся во вращающейся системе, действует лишь центробежная сила. Стол вращающейся лаборатории привинчен к полу — на него действует одна центробежная сила. А на мячик, который упал со стола и покатился по полу вращающейся лаборатории, кроме центробежной силы действует и сила Кориолиса.

От каких величин зависит значение силы Кориолиса? Его можно вычислить, но расчеты слишком сложны для того, чтобы приводить их здесь. Опишем поэтому лишь результат вычислений.

В отличие от центробежной силы, значение которой зависит от расстояния до оси вращения, сила Кориолиса не зависит от положения тела. Она определяется скоростью движения тела, и при этом не только значением скорости, но и ее направлением по отношению к оси вращения. Если тело движется вдоль оси вращения, то сила Кориолиса равна нулю. Чем больше угол между вектором скорости и осью вращения, тем больше сила Кориолиса; максимальное значение сила примет при движении тела под прямым углом к оси.

Как мы знаем, вектор скорости всегда можно разложить на какие-либо составляющие и рассмотреть раздельно два возникающих движения, в которых одновременно участвует тело.

Если разложить скорость тела на составляющие $v_{\parallel}$ и $v_{\perp}$ — параллельную и перпендикулярную к оси вращения, то первое движение не будет подвержено действию силы Кориолиса. Значение силы Кориолиса $F_{\text{К}}$ определится составляющей скорости $v_{\perp}$. Расчеты приводят к формуле

$$F_{\text{К}} = 4\pi n v_{\perp} m.$$

Здесь m — масса тела, а n — число оборотов, совершаемых вращающейся системой за единицу времени. Как видно из формулы, сила Кориолиса тем больше, чем быстрее вращается система и чем быстрее движется тело.

Расчеты устанавливают и направление силы Кориолиса. Эта сила всегда перпендикулярна к оси вращения и к направлению движения. При этом, как уже говорилось выше, сила направлена вправо по ходу движения в системе, вращающейся против часовой стрелки.

Действием силы Кориолиса объясняются многие интересные явления, происходящие на Земле. Земля — шар, а не диск. Поэтому проявления сил Кориолиса сложнее. Эти силы будут сказываться как на движении вдоль земной поверхности, так и при падении тел на Землю.

Падает ли тело строго по вертикали? Не вполне. Только на полюсе тело падает строго по вертикали. Направление движения и ось вращения Земли совпадают, поэтому сила Кориолиса отсутствует. Иначе обстоит дело на экваторе; здесь направление движения составляет прямой угол с земной осью. Если смотреть со стороны северного полюса, то вращение Земли представится нам против часовой стрелки. Значит, свободно падающее тело должно отклониться вправо по ходу движения, т. е. на восток. Величина восточного отклонения, наибольшего на экваторе, уменьшается до нуля с приближением к полюсам.

Подсчитаем величину отклонения на экваторе. Так как свободно падающее тело движется равномерно-ускоренно, то сила Кориолиса растет по мере приближения к земле. Поэтому мы ограничимся примерным подсчетом. Если тело падает с высоты, скажем, 80 м, то падение продолжается около 4 с (по формуле $t=\sqrt{2h/g}$). Средняя скорость при падении будет равна 20 м/с.

Это значение скорости мы и подставим в формулу кориолисова ускорения $4\pi nv$. Значение $n=1$ оборот за 24 часа переведем в число оборотов в секунду. В 24 часах содержится 24·3600 секунд, значит, $n=\frac{1}{86\,400}$ об/с и, следовательно, ускорение, которое создает сила Кориолиса, равно $\frac{\pi}{1080}$ м/с^2. Путь, пройденный с таким ускорением за 4 с, равен $\frac{1}{2}\cdot\frac{\pi}{1080}\cdot 4^2=2{,}3$ см. Это и есть величина восточного отклонения для нашего примера. Точный расчет, учитывающий неравномерность падения, дает близкую, но несколько иную цифру.

Если отклонение тела при свободном падении максимально на экваторе и равно нулю на полюсах, то обратную картину мы будем наблюдать в случае отклонения под действием кориолисовой силы тела, движущегося в горизонтальной плоскости.

Горизонтальная площадка на северном или южном полюсах ничем не отличается от вращающегося диска, с которого мы начали изучение силы Кориолиса. Тело, движущееся по такой площадке, будет отклоняться силой Кориолиса вправо по ходу движения на северном полюсе и влево по ходу движения на южном. Читатель без труда подсчитает, пользуясь той же формулой кориолисова ускорения, что пуля, выпущенная из ружья с начальной скоростью 500 м/с, отклонится от цели в горизонтальной плоскости за одну секунду (т. е. на пути 500 м) на отрезок, равный 3,5 см.

Но почему же отклонение в горизонтальной плоскости на экваторе должно равняться нулю? Без строгих доказательств понятно, что так должно быть. На северном полюсе тело отклоняется вправо по движению, на южном — влево, значит, посередине между полюсами, т. е. на экваторе, отклонение будет равно нулю.

Вспомним опыт с маятником Фуко. Маятник, колеблющийся на полюсе, сохраняет плоскость своих колебаний. Земля, вращаясь, уходит из-под маятника. Такое объяснение дает опыту Фуко звездный наблюдатель. А наблюдатель, вращающийся вместе с земным шаром, объяснит этот опыт силой Кориолиса. Действительно, сила Кориолиса направлена перпендикулярно к земной оси и перпендикулярно к направлению движения маятника; иначе говоря, сила перпендикулярна к плоскости колебания маятника и будет эту плоскость непрерывно поворачивать. Можно сделать так, чтобы конец маятника вычерчивал траекторию движения. Траектория представляет собой «розетку», показанную на рис. 2.15. На этом рисунке за полтора периода колебания маятника «Земля» поворачивается на четверть оборота. Маятник Фуко поворачивается много медленнее. На полюсе плоскость колебания маятника за одну минуту повернется на $^1/_4$ градуса. На северном полюсе плоскость будет поворачиваться вправо по ходу маятника, на южном — влево.

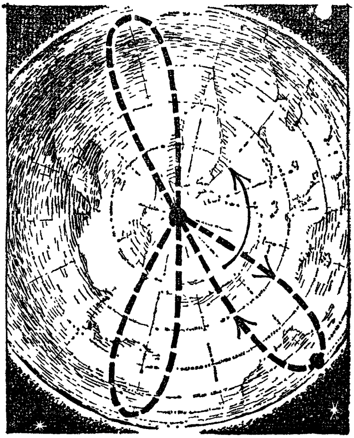


Рис. 2.15.

На широтах центральной Европы эффект Кориолиса будет несколько меньше, чем на экваторе. Пуля в примере, который мы только что привели, отклонится не на 3,5 см, а на 2,5 см. Маятник Фуко повернется за одну минуту примерно на $^1/_6$ градуса.

Должны ли учитывать силу Кориолиса артиллеристы? Пушка Берта, из которой немцы вели обстрел Парижа во время первой мировой войны, находилась в 110 км от цели. Отклонение Кориолиса достигает в этом случае 1600 м. Это уже не маленькая величина.

Если летающий снаряд будет отправлен на большое расстояние без учета силы Кориолиса, то он значитель-

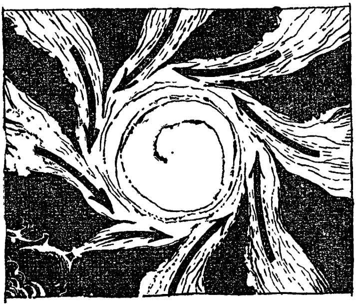


Рис. 2.16.

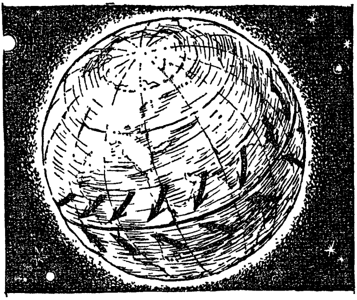


Рис. 2.17.

но отклонится от курса. Этот эффект велик не потому, что велика сила (для снаряда в 10 т, имеющего скорость 1000 км/ч, сила Кориолиса будет около 25 кгс), а потому, что сила действует непрерывно длительное время.

Конечно, влияние ветра на неуправляемый снаряд может быть не менее значительным. Поправка к курсу, которая дается пилотом, обусловлена действием ветра, эффектом Кориолиса и несовершенством самолета или самолета-снаряда.

Какие специалисты, кроме авиаторов и артиллеристов, должны принять эффект Кориолиса во внимание? К ним относятся, как ни странно, и железнодорожники. На железной дороге один рельс под действием кориолисовой силы истирается изнутри заметно больше другого. Нам ясно, какой именно: в северном полушарии это будет правый рельс (по ходу движения), в южном — левый. Лишены хлопот по этому поводу лишь железнодорожники экваториальных стран.

Размытие правых берегов в северном полушарии объясняется точно так же, как и истирание рельсов. Отклонения русла во многом связаны с действием силы Кориолиса. Оказывается, реки северного полушария обходят препятствия с правой стороны.

Известно, что в район пониженного давления направляются потоки воздуха. Но почему такой ветер называется циклоном? Ведь корень этого слова указывает на круговое (циклическое) движение.

Так оно и есть — в районе пониженного давления возникает круговое движение воздушных масс (рис. 2.16). Причина заключается в действии силы Кориолиса. В северном полушарии все устремляющиеся к месту пониженного давления воздушные потоки отклоняются вправо по своему движению. Посмотрите на рис. 2.17 — вы видите, что это приводит к отклонению дующих в обоих полушариях от тропиков к экватору ветров (пассатов) к западу.

Почему же такая небольшая сила играет такую большую роль в движении воздушных масс?

Это объясняется незначительностью сил трения. Воздух легко подвижен, и малая, но постоянно действующая сила приводит к важным следствиям.

Глава 3

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

ОТДАЧА

Даже тот, кто не был на войне, знает, что при выстреле из орудия его ствол резко отходит назад. При стрельбе из ружья происходит отдача в плечо. Но и не прибегая к огнестрельному оружию, можно ознакомиться с явлением отдачи. Налейте в пробирку воды, заткните ее пробкой и подвесьте пробирку на двух нитках в горизонтальном положении (рис. 3.1). Теперь поднесите к стеклу горелку — вода начнет кипеть, и минуты через две пробка с шумом вылетит в одну сторону, а пробирка отклонится в противоположную.

Сила, которая выбросила пробку из пробирки, это давление пара. И сила, отклонившая пробирку,— тоже давление пара. Оба движения возникли под действием одной и той же силы. То же самое происходит и при выстреле, только там действует не пар, а пороховые газы.

Явление отдачи необходимо следует из правила равенства действия и противодействия. Если пар действует на пробку, то и пробка действует на пар в обратную сторону, а пар передает это противодействие пробирке.

Но, может быть, вам приходит в голову возражение: разве может одна и та же сила приводить к столь разным следствиям? Ружье лишь слегка отходит обратно, а пуля летит далеко. Мы надеемся, однако, что такое возражение не пришло в голову читателю. Конечно, одинаковые силы могут приводит к разным следствиям: ведь ускорение, которое получает тело (а это и есть следствие действия силы), обратно пропорционально массе этого тела. Ускорение одного из тел (сна-

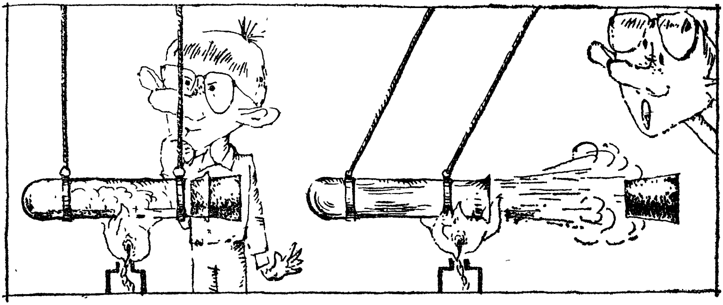


Рис. 3.1.

ряда, пули, пробки) мы должны записать в виде $a_1 = F/m_1$, ускорение же тела, испытавшего отдачу (орудия, винтовки, пробирки), будет $a_2 = F/m_2$. Так как сила одна и та же, то мы приходим к важному выводу: ускорения, полученные при взаимодействии двух тел, участвующих в «выстреле», будут обратно пропорциональны их массам:

$$a_1/a_2 = m_2/m_1.$$

Это значит, что ускорение, которое получит пушка при откате, будет во столько раз меньше ускорения снаряда, во сколько раз пушка весит больше, чем снаряд.

Ускорение пули, а также и ружья при отдаче, длится до тех пор, пока пуля движется в дуле ружья. Обозначим это время буквой t. Через этот промежуток времени ускоренное движение сменится равномерным. Для простоты будем считать ускорение неизменным. Тогда скорость, с которой пуля вылетит из дула ружья, будет $v_1 = a_1 t$, а скорость отдачи $v_2 = a_2 t$. Так как время действия ускорения одно и то же, то $v_1/v_2 = a_1/a_2$ и, следовательно,

$$v_1/v_2 = m_2/m_1.$$

Скорости, с которыми разлетаются тела после взаимодействия, будут обратно пропорциональны массам этих тел.

Если вспомнить векторный характер скорости, то последнее соотношение можно переписать так: $m_1 \mathbf{v}_1 = -m_2 \mathbf{v}_2$; знак минус говорит о том, что скорости $\mathbf{v}_1$ и $\mathbf{v}_2$ направлены в противоположные стороны.

Наконец, перепишем равенство еще раз — перенесем произведения масс на скорости в одну сторону равенства:

$$m_1v_1+m_2v_2=0.$$

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Произведение массы тела на его скорость называется импульсом тела (другое название — количество движения). Так как скорость — вектор, то и импульс является векторной величиной. Разумеется, направление импульса совпадает с направлением скорости движения тела.

При помощи нового понятия закон Ньютона $F=ma$ может быть выражен иначе. Так как $a=\frac{v_2-v_1}{t}$, то $F=\frac{mv_2-mv_1}{t}$, или $Ft=mv_2-mv_1$. Произведение силы на время ее действия равно изменению импульса тела.

Вернемся к явлению отдачи.

Наш результат рассмотрения отдачи орудия можно теперь сформулировать короче: сумма импульсов орудия и снаряда после выстрела остается равной нулю. Очевидно, такой же она была и до выстрела, когда орудие и снаряд находились в состоянии покоя.

Скорости, входящие в уравнение $m_1v_1+m_2v_2=0$, — это скорости непосредственно после выстрела. При дальнейшем движении снаряда и орудия на них начнут действовать силы тяжести, сопротивление воздуха, а на пушку дополнительно — и сила трения о землю. Вот если бы выстрел был произведен в безвоздушном пространстве из орудия, висящего в пустоте, тогда движение со скоростями v_1 и v_2 продолжалось бы сколь угодно долго. Орудие двигалось бы в одну сторону, а снаряд — в противоположную.

В артиллерийской практике в настоящее время широко применяются орудия, установленные на платформе и стреляющие на ходу. Как же изменить выведенное уравнение, чтобы оно было применимо к выстрелу из такого орудия? Мы можем записать:

$$m_1u_1+m_2u_2=0,$$

где u_1 и u_2 — скорости снаряда и орудия по отношению к движущейся платформе. Если скорость платформы V, то скорости орудия и снаряда по отношению к покоящемуся наблюдателю будут $v_1 = u_1 + V$ и $v_2 = u_2 + V$.

Подставляя значения u_1 и u_2 в последнее уравнение, получим:

$$(m_1 + m_2)\, V = m_1 v_1 + m_2 v_2.$$

В правой части равенства у нас стоит сумма импульсов снаряда и орудия после выстрела. А в левой? До выстрела орудие и снаряд с общей массой $m_1 + m_2$ движутся вместе со скоростью V. Значит, и в левой части равенства стоит общий импульс снаряда и орудия, но до выстрела.

Мы доказали очень важный закон природы, который называется законом сохранения импульса. Доказали мы его для двух тел, но можно легко показать, что такой же результат имеет место и для любого числа тел. Каково же содержание закона? Закон сохранения импульса говорит, что сумма импульсов нескольких тел, находящихся во взаимодействии, не меняется в результате этого взаимодействия.

Ясно, что закон сохранения импульса будет справедлив лишь тогда, когда на ту группу тел, которую мы рассматриваем, не действуют силы со стороны. Такая группа тел называется в физике замкнутой.

Ружье и пуля во время выстрела ведут себя, как замкнутая группа двух тел, несмотря на то, что испытывают действие силы земного притяжения. Вес пули мал по сравнению с силой пороховых газов, и явление отдачи произойдет по одним и тем же законам, независимо от того, где будет произведен выстрел — на Земле или в ракете, летящей в межпланетном пространстве.

Закон сохранения импульса позволяет легко решать различные задачи, относящиеся к столкновениям тел. Попробуем одним глиняным шариком попасть в другой — они слипнутся и будут продолжать движение вместе; если выстрелить из ружья в деревянный шар, он покатится вместе с застрявшей в нем пулей; стоявшая вагонетка покатится, если человек с разбегу прыгнет в нее. Все приведенные примеры с точки зрения физика весьма похожи. Правило, связывающее

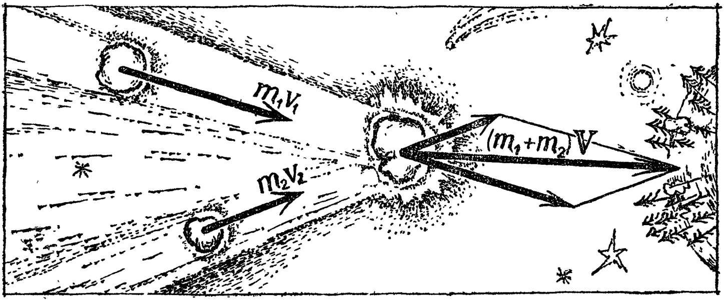


Рис. 3.2.

скорости тел при столкновениях такого типа, сразу же получается из закона сохранения импульса.

Импульсы тел до встречи были m_1v_1 и m_2v_2, после столкновения тела объединились, их общая масса равна m_1+m_2. Обозначив скорость объединившихся тел через V, получим:

$$m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)\,V,$$

или

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

Напомним о векторном характере закона сохранения импульса. Импульсы mv, стоящие в числителе формулы, надо складывать как векторы.

«Объединяющий» удар при встрече движущихся под углом тел показан на рис. 3.2. Для того чтобы найти скорость, надо длину диагонали параллелограмма, построенного на векторах импульсов встречающихся тел, разделить на сумму их масс.

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Человек движется, отталкиваясь от земли; лодка плывет потому, что гребцы отталкиваются веслами от воды; теплоход также отталкивается от воды, только не веслами, а винтами. Также отталкиваются от земли и поезд, идущий по рельсам, и автомашина,— вспомните, как трудно автомашине сдвинуться с места в гололедицу.

Итак, отталкивание от опоры — как будто бы необходимое условие движения; даже самолет и тот движется, отталкиваясь винтом от воздуха.

Рис. 3.3.

Однако так ли это? Нет ли какого-нибудь хитрого способа двигаться, ни от чего не отталкиваясь? Если вы катаетесь на коньках, то легко можете убедиться на своем опыте, что такое движение вполне возможно. Возьмите в руки тяжелую палку и встаньте на лед. Бросьте палку вперед — что произойдет? Вы покатитесь назад, хотя и не думали отталкиваться ногой от льда.

Явление отдачи, которое мы только что изучали, дает нам в руки ключ к осуществлению движения без опоры, движения без отталкивания. Отдача дает возможность ускорять движение и в безвоздушном пространстве, где уж решительно не от чего отталкиваться.

Отдача, вызываемая выбрасываемой из сосуда струей пара (реакция струи), использовалась еще в древности для создания любопытных игрушек. На рис. 3.3 изображена древняя паровая турбина, изобретенная во втором веке до нашей эры. Шаровой котел опирался на вертикальную ось. Вытекая из котла через коленчатые трубки, пар толкал эти трубки в обратном направлении, и шар вращался.

В наши дни использование реактивного движения уже вышло далеко за пределы создания игрушек и сбора интересных наблюдений. Двадцатый век называют иногда веком атомной энергии, однако с не меньшим основанием его можно назвать веком реактивного движения, так как трудно переоценить те далекие последствия, к которым приведет использование мощных реактивных двигателей. Это не только революция в самолетостроении, это начало общения человека со Вселенной.

Принцип реактивного движения позволил создать самолеты, движущиеся со скоростью в несколько тысяч километров в час, летающие снаряды, поднимающиеся на высоту в сотни километров над Землей, искусственные спутники Земли и космические ракеты, совершающие межпланетные путешествия.

Реактивный двигатель — это машина, из которой выбрасываются с большой силой образующиеся при горении топлива газы. Ракета движется в сторону, обратную направлению газового потока.

Чему равна сила тяги, уносящая ракету в пространство? Мы знаем, что сила равна изменению импульса в единицу времени. Согласно закону сохранения, импульс ракеты меняется на величину импульса mv выброшенного газа.

Этот закон природы позволяет вычислить, например, связь между силой реактивной тяги и необходимым для этого расходом топлива. При этом нужно предположить, какова скорость истечения продуктов сгорания. Возьмем, например, такие цифры: газы выбрасываются со скоростью 2000 м/с в количестве 10 т/с, тогда сила тяги будет примерно равна $2 \cdot 10^{12}$ дин, т. е. круглым счетом 2000 тс.

Определим изменение скорости движущейся в межпланетном пространстве ракеты.

Импульс массы газа ΔM, выброшенной со скоростью u, равняется $u \cdot \Delta M$. Импульс ракеты массы M возрастет при этом на величину $M \cdot \Delta V$. Согласно закону сохранения, эти две величины равны друг другу:

$$u \cdot \Delta M = M \cdot \Delta V,$$

т. е.

$$\Delta V = u \cdot \frac{\Delta M}{M}.$$

Однако, если мы захотим вычислить скорость ракеты при выбрасывании масс, сравнимых с массой ракеты, то выведенная формула окажется непригодной. Ведь она предусматривает неизменную массу ракеты. Однако в силе остается следующий важный результат: при одинаковых относительных изменениях массы скорость увеличивается на одну и ту же величину.

Читатель, знакомый с основами интегрального исчисления, сразу же получит и точную формулу. Она имеет вид:

$$V = u \ln \frac{M_{\text{нач}}}{M} = 2{,}3u \log \frac{M_{\text{нач}}}{M}.$$

Если у вас под руками логарифмическая линейка, то вы выясните, что при уменьшении массы ракеты вдвое скорость ее достигнет $0{,}7u$.

Для того чтобы довести скорость ракеты до $3\,u$, надо сжечь массу вещества $m = \frac{19}{20} M$. Это значит, что лишь 1/20 массы ракеты можно сохранить, если мы желаем довести скорость до $3\,u$, т. е. до 6—8 км/с.

Чтобы добиться скорости в $7\,u$, масса ракеты за время разгона должна уменьшиться в 1000 раз.

Эти расчеты предостерегают нас от погони за увеличением массы горючего, которое можно захватить в ракету. Чем больше мы возьмем горючего, тем больше придется его сжечь. При данной скорости истечения газов очень трудно добиться увеличения скорости ракеты.

Основное в задаче достижения больших скоростей у ракет — увеличение скорости истечения газов. В этом отношении существенную роль должно сыграть применение в ракетах двигателей, работающих на новом, ядерном горючем.

При неизменной скорости истечения газов выигрыш в скорости при той же массе горючего получается при использовании многоступенчатых ракет. В одноступенчатой ракете уменьшается масса топлива, а пустые баки продолжают движение с ракетой. На ускорение массы ненужных топливных баков требуется дополнительная энергия. Целесообразно с израсходованием топлива отбросить и топливные баки. В современных многоступенчатых ракетах отбрасываются не только баки и трубопроводы, но и двигатели отработавших ступеней.

Разумеется, лучше всего было бы отбрасывать ненужную массу ракеты непрерывно. Пока такой конструкции не существует. Стартовый вес трехступенчатой ракеты с таким же «потолком», как у одноступенчатой ракеты, может быть сделан в 6 раз меньшим. «Непрерывная» ракета выгоднее трехступенчатой в этом смысле еще на 15%.

ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Будем скатывать небольшую тележку с двух очень гладких наклонных плоскостей. Одну доску возьмем значительно короче другой и положим их на одну и ту же опору. Тогда одна наклонная плоскость будет крутой, а другая — пологой. Верхушки обеих досок — места старта тележки — будут на одинаковой высоте. Как вы полагаете, какая из тележек приобретет бóльшую скорость, скатившись с наклонной доски? Многие решат, что та, которая съехала по более крутой плоскости.

Опыт покажет, что они ошиблись,— тележки приобретут одинаковую скорость. Пока тело движется по наклонной плоскости, оно находится под действием постоянной силы, а именно (рис. 3.4) под действием составляющей силы тяжести, направленной вдоль движения. Скорость v, которую приобретает тело, движущееся с ускорением a на пути S, равна, как мы знаем, $v=\sqrt{2aS}$.

Откуда же видно, что эта величина не зависит от угла наклона плоскости? На рис. 3.4 мы видим два треугольника. Один из них изображает наклонную плоскость. Малый катет этого треугольника, обозначенный буквой h,— высота, с которой начинается движение; гипотенуза S есть путь, проходимый телом в ускоренном движении. Маленький треугольник сил с катетом ma и гипотенузой mg подобен большому, так как они прямоугольные и углы их равны как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Значит, отношение катетов должно равняться отношению гипотенуз, т. е.

$$h/ma=S/mg, \quad \text{или} \quad aS=gh.$$

Мы доказали, что произведение aS, а значит, и конечная скорость тела, скатившегося с наклонной плоскости, не зависит от угла наклона, а зависит лишь от высоты, с которой началось движение вниз. Скорость $v=\sqrt{2gh}$ для всех наклонных плоскостей при единственном условии, что движение началось с одной и той же высоты h. Эта скорость оказалась равной скорости свободного падения с высоты h.

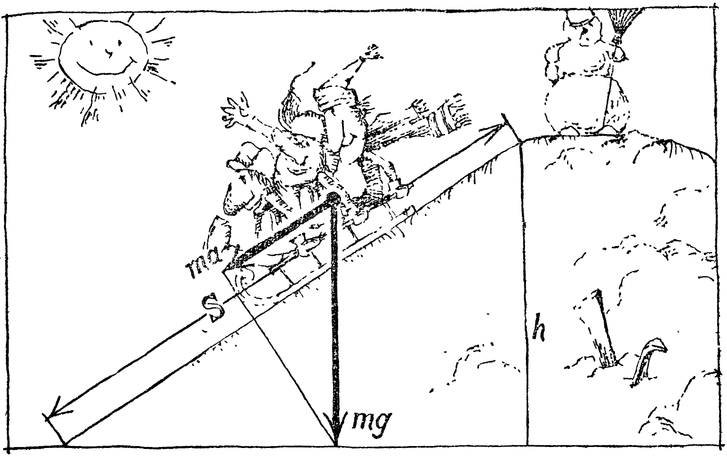


Рис. 3.4

Измерим скорость тела в двух местах наклонной плоскости — на высотах h_1 и h_2. Скорость тела в момент прохождения через первую точку обозначим v_1, а скорость в момент прохождения через вторую точку — v_2.

Если начальная высота, с которой началось движение, есть h, то квадрат скорости тела в первой точке будет $v_1^2=2g(h-h_1)$, а во второй точке $v_2^2=2g(h-h_2)$. Вычитая первое из второго, мы найдем, как связаны скорости тела в начале и в конце какого угодно кусочка наклонной плоскости с высотами этих точек:

$$v_2^2-v_1^2=2g(h_1-h_2).$$

Разность квадратов скоростей зависит лишь от разности высот. Заметим, что полученное уравнение одинаково пригодно для движений вверх и для движений вниз. Если первая высота меньше второй (подъем), то вторая скорость меньше первой.

Эту формулу можно переписать следующим образом:

$$\frac{v_1^2}{2}+gh_1=\frac{v_2^2}{2}+gh_2.$$

Мы хотим подчеркнуть такой записью, что сумма половины квадрата скорости и высоты, умноженной на g, одинакова для любой точки наклонной плоскости.

Можно сказать, что величина $\frac{v^2}{2}+gh$ сохраняется во время движения.

Самое замечательное в найденном нами законе то, что он справедлив для движения без трения по любой горке и вообще по любому пути, состоящему из чередующихся подъемов и спусков различной крутизны. Это следует из того, что любой путь можно разбить на прямолинейные участки. Чем меньше брать отрезки, тем ближе будет приближаться ломаная линия к кривой. Каждый прямой отрезок, на которые разбит криволинейный путь, можно считать частью наклонной плоскости и применить к нему найденное правило.

Значит, в любой точке траектории сумма $\frac{v^2}{2}+gh$ одинакова. Поэтому изменение квадрата скорости не зависит от формы и длины пути, по которому двигалось тело, а определяется лишь разностью высот точек начала и конца движения.

Читателю может показаться, что наше заключение не совпадает с повседневным опытом: на длинном отлогом пути тело вовсе не набирает скорость и в конце концов остановится. Так оно и есть, но ведь мы в наших рассуждениях не учитывали силу трения. Написанная выше формула верна для движения в поле тяжести Земли под действием одной лишь силы тяжести. Если силы трения малы, то выведенный закон будет выполняться совсем неплохо. На гладких ледяных горах санки с металлическими полозьями скользят с очень небольшим трением. Можно устроить длинные ледяные дорожки, начинающиеся с крутого спуска, на котором набирается большая скорость, а затем причудливо извивающиеся вверх и вниз. Конец путешествия по таким горкам (когда санки остановятся сами собой) при полном отсутствии трения произошел бы на высоте, равной начальной. А так как трения избежать нельзя, то точка, с которой началось движение санок, будет выше того места, где они остановятся.

Закон, по которому конечная скорость не зависит от формы пути при движении под действием силы тяжести, может быть применен для решения различных интересных задач.

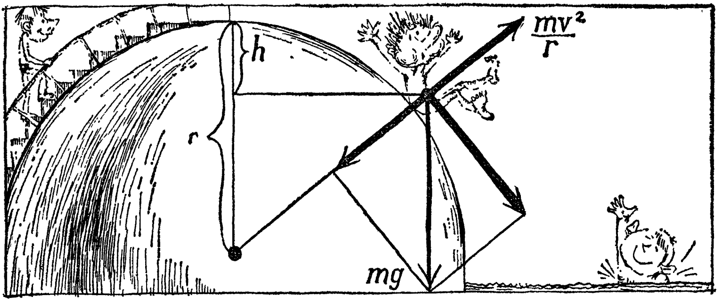


Рис. 3.5.

В цирке много раз показывали как захватывающий аттракцион вертикальную «мертвую петлю». Велосипедист или тележка с акробатом устанавливаются на высоком помосте. Ускоряющийся спуск, затем подъем. Вот акробат уже в положении вниз головой, опять спуск — и мертвая петля описана. Рассмотрим задачу, которую приходится решать инженеру цирка. На какой высоте надо сделать помост, с которого начинается спуск, чтобы акробат не свалился в наивысшей точке мертвой петли? Условие нам известно: центробежная сила, прижимающая акробата к помосту, должна уравновесить силу тяжести, направленную в противоположную сторону. Значит, $mg \leqslant \frac{mv^2}{r}$, где r — радиус мертвой петли, а v — скорость движения в верхней точке петли. Для того чтобы эта скорость была достигнута, надо начать движение с места, расположенного выше верхней точки петли на некоторую величину h. Начальная скорость акробата равна нулю, поэтому в верхней точке петли $v^2=2gh$. Но, с другой стороны, $v^2 \geqslant gr$. Значит, между высотой h и радиусом петли имеется соотношение $h \geqslant \frac{r}{2}$. Помост должен возвышаться над верхней точкой петли на величину, не меньшую половины радиуса петли. Учитывая неизбежную силу трения, приходится, конечно, брать некоторый запас высоты.

А вот еще одна задача. Возьмем круглый купол, очень гладкий, чтобы трение было минимальным. На вершину положим небольшой предмет и едва заметным толчком дадим ему возможность скользить по куполу. Рано или поздно скользящее тело отделится от купола и начнет падать. Мы можем легко решить вопрос, когда именно тело оторвется от поверхности купола: в момент отрыва центробежная сила должна равняться составляющей веса на направление радиуса (в этот момент тело перестанет давить на купол, а это и есть момент отрыва). На рис. 3.5 видны два подобных треугольника; изображен момент отрыва. Составим отношение катета к гипотенузе для треугольника сил и приравняем к соответствующему отношению сторон другого треугольника:

$$\frac{mv^2/r}{mg}=\frac{r-h}{r}.$$

Здесь r — радиус сферического купола, а h — разность высот от начала до конца скольжения. Теперь используем закон о независимости конечной скорости от формы пути. Так как начальная скорость тела предполагается равной нулю, то $v^2=2gh$. Подставив это значение в написанную выше пропорцию и произведя арифметические преобразования, найдем: $h=\frac{r}{3}$. Значит, тело оторвется от купола на высоте, находящейся на $^1/_3$ радиуса ниже вершины купола.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Мы убедились на только что рассмотренных примерах, как полезно знать величину, не изменяющую свое числовое значение (сохраняющуюся) при движении.

Пока мы знаем такую величину лишь для одного тела. А если в поле тяжести движется несколько связанных тел? Считать, что для каждого из них остается верным выражение $\frac{v^2}{2}+gh$, явно нельзя, так как каждое из тел находится под действием не только силы тяжести, но и соседних тел. Может быть сохраняется сумма таких выражений, взятая для группы рассматриваемых тел?

Сейчас мы покажем, что это предположение неправильно. Сохраняющаяся при движении многих тел величина существует, но она не равна сумме

$$\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{тело } 1}+\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{тело } 2}+\ldots,$$

а равна сумме подобных выражений, умноженных на массы соответствующих тел; иначе говоря, сохраняется сумма

$$m_1\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_1+m_2\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_2+\ldots$$

Для доказательства этого важнейшего закона механики обратимся к следующему примеру.

Через блок перекинуты два груза,— большой массы M и маленький массы m. Большой груз тянет маленький, и эта группа из двух тел движется с возрастающей скоростью.

Движущей силой является разность в весе этих тел, $Mg—mg$. Так как в ускоренном движении участвует масса обоих тел, то закон Ньютона для этого случая будет записан так:

$$(M-m)\,g=(M+m)\,a.$$

Рассмотрим два момента движения и покажем, что сумма выражений $\frac{v^2}{2}+gh$, помноженных на соответствующие массы, действительно остается неизменной. Итак, требуется доказать равенство

$$m\left(\frac{v_2^2}{2}+gh_2\right)+M\left(\frac{V_2^2}{2}+gH_2\right)=$$
$$=m\left(\frac{v_1^2}{2}+gh_1\right)+M\left(\frac{V_1^2}{2}+gH_1\right).$$

Заглавными буквами обозначены физические величины, характеризующие большой груз. Индексы 1 и 2 относят здесь величины к двум рассматриваемым моментам движения.

Так как грузы связаны веревкой, то $v_1=V_1$, $v_2=V_2$. Используя эти упрощения и перенося все члены, содержащие высоты, вправо, а члены со скоростями —

влево, получим:

$$\frac{m+M}{2}(v_2^2-v_1^2)=mgh_1+MgH_1-mgh_2-MgH_2=$$
$$=mg(h_1-h_2)+Mg(H_1-H_2).$$

Разности высот грузов, разумеется, равны (но с обратным знаком, так как один груз поднимается, а другой опускается). Таким образом,

$$\frac{m+M}{2}(v_2^2-v_1^2)=g(M-m)S,$$

где S — пройденный путь.

На стр. 51 мы узнали, что разность квадратов скоростей $v_1^2-v_2^2$ в начале и конце отрезка S пути, проходимого с ускорением a, равна

$$v_1^2-v_2^2=2aS.$$

Подставляя это выражение в последнюю формулу, найдем:

$$(m+M)a=(M-m)g.$$

Но это есть закон Ньютона, записанный выше для нашего примера. Этим доказано требуемое: для двух тел сумма выражений $\frac{v^2}{2}+gh$, умноженных на соответствующие массы *), во время движения остается неизменной, или, как говорят, сохраняется, т. е.

$$\left(\frac{mv^2}{2}+mgh\right)+\left(\frac{MV^2}{2}+MgH\right)=\text{const}.$$

Для случая с одним телом эта формула перейдет в ранее доказанную:

$$\frac{v^2}{2}+gh=\text{const}.$$

---

*) Разумеется, выражение $\frac{v^2}{2}+gh$ можно умножить с равным успехом на $2m$ или на $m/2$ и вообще дополнительно на любой коэффициент. Условились поступать простейшим образом, т. е. умножать просто на m.

Половина произведения массы на квадрат скорости называется кинетической энергией K:

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

Произведение веса тела на высоту называют потенциальной энергией тяготения тела к Земле U:

$$U = mgh.$$

Мы доказали, что во время движения системы из двух тел (и можно доказать то же самое для системы, состоящей из многих тел) сумма кинетической и потенциальной энергий тел остается неизменной.

Другими словами, увеличение кинетической энергии группы тел может произойти лишь за счет убыли потенциальной энергии этой системы (и, разумеется, наоборот).

Доказанный закон называется законом сохранения механической энергии.

Закон сохранения механической энергии является очень важным законом природы. Значение его мы еще не показали в полной мере. Позже, когда мы познакомимся с движением молекул, будет видна его универсальность, применимость ко всем явлениям природы.

РАБОТА

Если толкать или тянуть тело, не встречая при этом никакой помехи, то результатом будет ускорение тела. Происшедшее при этом приращение кинетической энергии называют работой силы A:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

По закону Ньютона ускорение тела, а следовательно, и прирост кинетической энергии определяется векторной суммой всех сил, приложенных к телу. Значит, в случае многих сил формула $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ есть работа результирующей силы. Выразим работу A через величину силы.

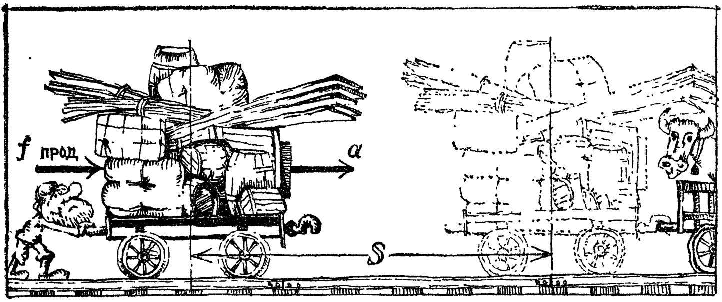


Рис. 3.6.

Для простоты мы ограничимся случаем, когда движение возможно лишь в одном направлении — будем толкать (или тянуть) вагонетку массы m, стоящую на рельсах (рис. 3.6).

Согласно общей формуле равномерно-ускоренного движения $v_2^2-v_1^2=2aS$. Поэтому работа всех сил на пути S

$$A=\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{2}=maS.$$

Произведение ma равно составляющей суммарной силы на направление движения. Таким образом, $A=$ $=f_{\text{прод}}\cdot S$.

Работа силы измеряется произведением пути на составляющую силы вдоль направления пути.

Формула работы справедлива для сил любого происхождения и для движений по любой траектории.

Заметим, что работа может быть равна нулю и тогда, когда на движущееся тело действуют силы.

Например, работа силы Кориолиса равняется нулю. Ведь эта сила перпендикулярна к направлению движения. Продольной составляющей у нее нет, поэтому равна нулю и работа.

Любое искривление траектории, не сопровождающееся изменением скорости, не требует работы — ведь кинетическая энергия при этом не меняется.

Может ли быть работа отрицательной? Конечно, если сила направлена под тупым углом к движению, то она не помогает, а мешает движению. Продольная составляющая силы на направление будет отрицательной. В этом случае мы и скажем, что сила производит отрицательную работу. Сила трения всегда замедляет движение, т. е. производит отрицательную работу.

По приращению кинетической энергии можно судить о работе лишь результирующей силы.

Что же касается работ отдельных сил, то мы должны их вычислять как произведения $f_{прод} \cdot S$. Автомобиль равномерно движется по шоссе. Прироста кинетической энергии нет, значит, работа результирующей силы равна нулю. Но, разумеется, не равна нулю работа мотора — она равна произведению силы тяги на пройденный путь и полностью компенсируется отрицательной работой сил сопротивления и трения.

Пользуясь понятием «работа», мы можем более коротко и ясно описать те интересные особенности силы тяжести, с которыми мы только что знакомились. Если под действием силы тяжести тело перейдет из одного места в другое, то кинетическая энергия его изменится. Это изменение кинетической энергии равно работе A. Но из закона сохранения энергии нам известно, что прирост кинетической энергии происходит за счет убыли потенциальной.

Таким образом, работа силы тяжести равна убыли потенциальной энергии:

$$A = U_1 - U_2.$$

Очевидно, что убыль (или прирост) потенциальной энергии, а значит и прирост (или уменьшение) кинетической энергии будут одни и те же, независимо от того, по какому пути тело двигалось. Это означает, что работа силы тяжести не зависит от формы пути. Если тело перешло из первой точки во вторую с увеличением кинетической энергии, то из второй точки в первую оно перейдет с уменьшением кинетической энергии на точно такую же величину. При этом безразлично, совпадает ли форма пути «туда» с формой пути «обратно». Значит, и работы «туда» и «обратно» будут одинаковы. А если тело проделывает длинное путешествие, но конец пути совпадает с началом, то работа будет равна нулю.

Представьте себе какой угодно причудливой формы канал, по которому без трения скользит тело. Отправим его в путешествие с самой высокой точки. Тело помчится вниз, набирая скорость. За счет полученной кинетической энергии тело будет преодолевать подъем и наконец вернется к станции отправления. С какой скоростью? Разумеется, с той же, с которой оно покинуло станцию. Потенциальная энергия вернется к прежнему значению. А если так, то кинетическая энергия не могла ни уменьшиться, ни увеличиться. Значит, работа равна нулю.

Работа по кольцевому (физики говорят — по замкнутому) пути равна нулю не для всех сил. Нет надобности доказывать, что работа сил трения, например, будет тем больше, чем длиннее путь.

В КАКИХ ЕДИНИЦАХ ИЗМЕРЯЮТ РАБОТУ И ЭНЕРГИЮ

Так как работа равна изменению энергии, то работа и энергия — разумеется, как потенциальная, так и кинетическая — измеряются в одних и тех же единицах. Работа равна произведению силы на путь. Работу силы в одну дину на пути в один сантиметр называют эргом (эрг):

$$1 \text{ эрг} = 1 \text{ дин} \cdot 1 \text{ см}.$$

Это очень небольшая работа. Такую работу против силы тяжести совершит комар, чтобы перелететь с большого пальца руки на указательный. Более крупная единица работы и энергии, употребляющаяся в физике,— джоуль (Дж). Он в 10 миллионов раз больше эрга:

$$1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}.$$

Довольно часто используется единица работы 1 килограмм-сила-метр (1 кгс·м) — это работа, которая совершается силой в 1 кгс на пути в 1 м. Примерно такая работа совершается килограммовой гирей, упавшей на пол со стола.

Как нам известно, сила 1 кгс = 981 000 дин, 1 м = = 100 см. Значит, 1 кгс·м = $9{,}81 \cdot 10^7$ эрг = 9,81 Дж. Наоборот, 1 Дж = 0,102 кгс·м.

Новая система СИ требует, чтобы мы распрощались с килограмм-сила-метрами и использовали джоуль;

1 Дж равен работе, которая совершается силой в 1 Н на пути в 1 м. Зная, как просто определяется в данном случае сила, нетрудно понять преимущество системы СИ.

МОЩНОСТЬ И К.П.Д. МАШИН

Чтобы судить о возможности машины производить работу, а также о потреблении работы, пользуются понятием мощности. Мощность — это работа, совершенная в единицу времени.

Существует много различных единиц мощности. Системе CGS соответствует единица мощности эрг в секунду (эрг/с). Но 1 эрг/с — ничтожно малая мощность, и эта единица поэтому для практики неудобна. Несравненно более распространена единица мощности, которую получают делением джоуля на секунду. Эта единица называется ватт (Вт): 1 Вт=1 Дж/с=10^7 эрг/с.

Когда и эта единица мала, ее умножают на тысячу и пользуются киловаттом (кВт).

От старых времен перешла к нам в наследство единица мощности, называемая лошадиной силой. Когда-то на заре развития техники это название имело глубокий смысл. Машина мощностью в 10 лошадиных сил заменяет 10 лошадей — так заключал покупатель, даже если он не имел представления о единицах мощности.

Разумеется, лошадь лошади рознь. Автор первой единицы мощности, по-видимому, полагал, что «средняя» лошадь способна произвести за одну секунду 75 кгс·м работы. Такая единица и принята: 1 л. с.= =75 кгс·м/с.

Тяжеловозы способны производить большую работу, в особенности в момент трогания с места. Однако мощность средней лошади скорее близка к $^1/_2$ лошадиной силы.

Пересчитывая лошадиные силы в киловатты, получим: 1 л. с.=0,735 кВт.

В житейской практике и технике мы сталкиваемся с двигателями самых различных мощностей. Мощность патефонного моторчика 10 Вт, мощность двигателя автомашины «Волга» 100 л. с.=73 кВт, мощность двигателей пассажирского самолета ИЛ-18 16 000 л. с.

Небольшая колхозная электростанция имеет мощность 100 кВт. Рекордная в этом отношении Красноярская ГЭС имеет мощность 5·млн. кВт.

Единицы мощности, с которыми мы познакомились, подсказывают еще одну единицу энергии, хорошо известную всюду, где установлены счетчики электрической энергии, а именно киловатт-час (кВт·ч). Один киловатт-час — это работа, произведенная в течение одного часа мощностью в один киловатт. Легко пересчитать эту новую единицу в другие, уже знакомые: 1 кВт·ч$=3{,}6\cdot10^6$ Дж$=861$ ккал$=367\,000$ кгс·м. Читатель может спросить: неужели нужна была еще одна единица энергии? Ведь их и так уже немало! Но понятие энергии пронизывает разные области физики, и, думая об удобствах данной области, физики вводили все новые и новые единицы энергии. То же самое происходило и в отношении других физических величин. Это привело, наконец, к выводу о необходимости ввести единую для всех областей физики систему единиц СИ (см. стр. 14). Однако еще пройдет немало времени, пока «старые» единицы уступят место счастливой избраннице, и поэтому пока киловатт-час еще не последняя единица энергии, с которой придется знакомиться в процессе изучения физики.

При помощи различных машин можно заставить источники энергии производить различную работу — поднимать грузы, двигать станки, перевозить грузы и людей.

Можно подсчитать количество энергии, вложенной в машину, и значение полученной от нее работы. Во всех случаях цифра на выходе окажется меньше, чем цифра на входе,— часть энергии теряется в машине. Доля энергии, которая полностью используется в машине на нужные нам цели, называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) машины. Значения к. п. д. дают обычно в процентах.

Если к. п. д. равен 90%, это значит, что машина теряет всего 10% энергии. К. п.д. 10% означает, что машина использует всего лишь 10% поступившей в нее энергии.

Если машина превращает в работу механическую энергию, то ее к. п. д. в принципе можно сделать очень большим. Увеличение к. п. д. достигается в этом случае борьбой с неизбежным трением. Улучшить смазку, ввести более совершенные подшипники, уменьшить сопротивление со стороны среды, в которой происходит движение,— вот средства приблизить к. п. д. к единице (к 100%).

Обычно при превращении механической энергии в работу в качестве промежуточного этапа (как на гидроэлектростанциях) используют электрическую передачу. Разумеется, это тоже связано с дополнительными потерями. Однако они невелики, и потери при преобразовании механической энергии в работу и в случае использования электрической передачи могут быть сведены к нескольким процентам.

УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Читатель, вероятно, обратил внимание на то, что при иллюстрациях закона сохранения механической энергии мы настойчиво повторяем: «при отсутствии трения, если бы не было трения...». Но ведь трение неизбежно сопровождает любое движение. Какое же значение имеет закон, не учитывающий столь важного практического обстоятельства? Ответ на этот вопрос мы отложим, а сейчас посмотрим, к чему приводит трение.

Силы трения направлены против движения, а значит, производят отрицательную работу. Это вызывает неминуемую потерю механической энергии.

Приведет ли эта неизбежная потеря механической энергии к прекращению движения? Нетрудно убедиться, что трение может остановить не всякое движение.

Представим себе замкнутую систему, состоящую из нескольких взаимодействующих тел. В отношении такой замкнутой системы справедлив, как мы знаем, закон сохранения импульса. Замкнутая система не может изменить своего импульса, поэтому движется прямолинейно и равномерно. Трение внутри такой системы может уничтожить относительные движения частей системы, но не повлияет на скорость и направление движения всей системы в целом.

Существует и еще один закон природы, называемый законом сохранения момента импульса (с ним мы познакомимся позже), который не дает трению уничтожить равномерное вращение всей замкнутой системы.

Таким образом, наличие трения приводит к прекращению всех движений в замкнутой системе тел, не препятствуя лишь равномерному прямолинейному и равномерному вращательному движению этой системы в целом.

Если земной шар и меняет незначительно скорость своего вращения, то причина этого — не трение земных тел друг о друга, а то, что Земля не является изолированной системой.

Что же касается движений тел на Земле, то все они подвержены трению и теряют свою механическую энергию. Поэтому движение всегда прекращается, если не поддерживается извне.

Таков закон природы. А если бы удалось обмануть природу? Тогда... тогда можно было бы осуществить перпетуум мобиле, что означает по-латыни «вечное движение».

ПЕРПЕТУУМ МОБИЛЕ

Об осуществлении перпетуум мобиле мечтает Бертольд — герой «Сцен из рыцарских времен» Пушкина. «Что такое перпетуум мобиле?» — спрашивает его собеседник. «Это вечное движение,— отвечает Бертольд.— Если найду вечное движение, то я не вижу границ творчеству человека. Делать золото — задача заманчивая, открытие может быть любопытное, выгодное, но найти разрешение перпетуум мобиле...».

Перпетуум мобиле, или вечный двигатель,— это машина, работающая не только вопреки закону уменьшения механической энергии, но и нарушающая закон сохранения механической энергии, который, как мы теперь знаем, выполняется лишь в идеальных, недостижимых условиях — при отсутствии трения. Вечный двигатель, как только он будет сконструирован, должен начать работать «сам по себе» — например, вращать колесо или подымать грузы снизу вверх. Работа эта должна происходить вечно и непрерывно, а двигатель не должен требовать ни топлива, ни рук человеческих, ни энергии падающей воды — словом ничего, взятого извне.

Первый до сих пор известный достоверный документ об «осуществлении» идеи вечного двигателя относится к XIII в. Любопытно, что спустя шесть веков, в 1910 г., в одно из московских научных учреждений был представлен на «рассмотрение» буквально такой же «проект».

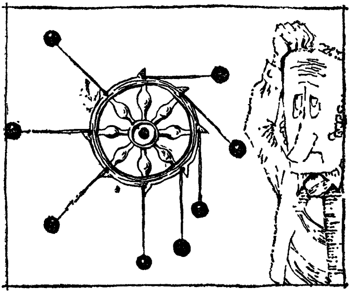


Рис. 3.7.

Проект этого вечного двигателя изображен на рис. 3.7. При вращении колеса грузы перекидываются и поддерживают, по мысли изобретателя, движение, так как откинувшиеся грузы давят гораздо сильнее, действуя на более далеком от оси расстоянии. Построив эту отнюдь не сложную «машину», изобретатель убеждается, что, повернувшись по инерции на один или два оборота, колесо останавливается. Но это не приводит его в уныние. Допущена ошибка: рычаги надо сделать длиннее, форму выступов изменить. И бесплодная работа, которой многие доморощенные изобретатели посвящали свою жизнь, продолжается, но, разумеется, с тем же успехом.

Вариантов предлагавшихся вечных двигателей было в общем немного: разнообразные самодвижущиеся колеса, в принципе не отличающиеся от описанного, гидравлические двигатели — например, показанный на рис. 3.8 двигатель, изобретенный в 1634 г.; двигатели,

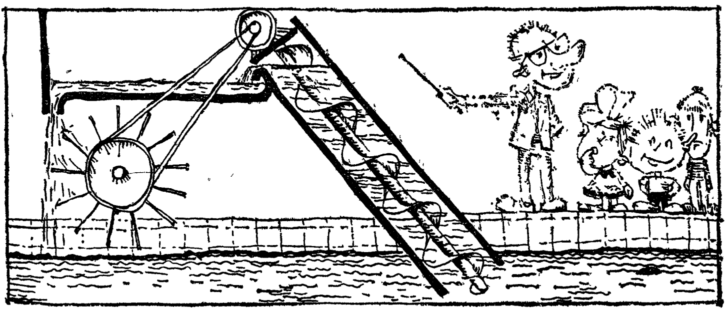


Рис. 3.8.

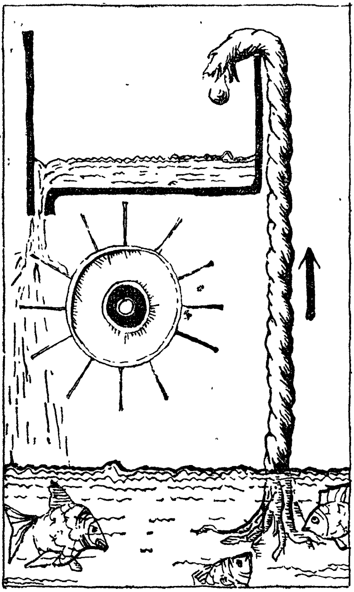


Рис. 3.9.

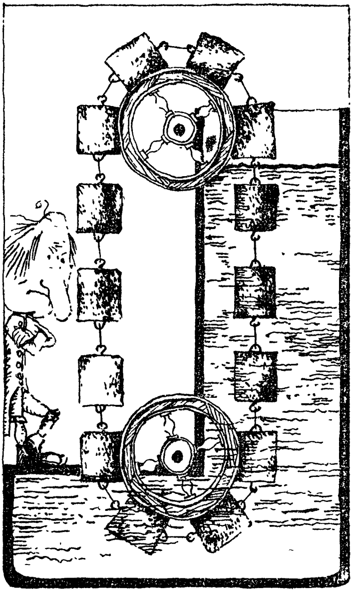


Рис. 3.10.

использующие сифоны или капиллярные трубки (рис. 3.9), потерю веса в воде (рис. 3.10), притяжение железных тел магнитами. Далеко не всегда можно догадаться, за счет чего же должно было, по идее изобретателя, происходить вечное движение.

Еще до установления закона сохранения энергии утверждение о невозможности перпетуум мобиле мы находим в официальном заявлении французской Академии, сделанном в 1775 г., когда она решила не принимать больше для рассмотрения и испытания никакие проекты вечных двигателей.

Многие механики XVII—XVIII вв. уже клали в основу своих доказательств аксиому о невозможности перпетуум мобиле, несмотря на то, что понятие энергии и закон сохранения энергии вошли в науку много позже.

В настоящее время ясно, что изобретатели, которые пытаются создать вечный двигатель, не только входят в противоречие с экспериментом, но и совершают ошибку против элементарной логики. Ведь невозможность перпетуум мобиле есть прямое следствие из законов механики, из которых они же исходят, обосновывая свое «изобретение».

Несмотря на полную бесплодность, поиски вечного двигателя, вероятно, сыграли все же какую-то полезную роль, так как в конечном счете привели к открытию закона сохранения энергии.

СТОЛКНОВЕНИЯ

При всяком столкновении двух тел всегда сохраняется импульс. Что же касается энергии, то она, как мы только что выяснили, обязательно уменьшится из-за различного рода трения.

Однако, если сталкивающиеся тела сделаны из упругого материала, например из кости или стали, то потеря энергии будет незначительной. Такие столкновения, при которых суммы кинетических энергий до и после столкновения одинаковы, называются идеально упругими.

Небольшая потеря кинетической энергии происходит и при столкновении самых упругих материалов — у костяных биллиардных шаров она достигает, например, 3—4%.

Сохранение кинетической энергии при упругом ударе позволяет решить ряд задач.

Рассмотрим, например, лобовое столкновение шаров разной массы. Уравнение импульса имеет вид (мы считаем, что шар № 2 покоился до удара)

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

а энергии —

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2},$$

где v_1 — скорость первого шара до столкновения, а u_1 и u_2 — скорости шаров после столкновения.

Так как движение происходит вдоль прямой линии (проходящей через центры шаров — это и означает, что удар лобовой), то применять векторные обозначения здесь не обязательно.

Из первого уравнения имеем:

$$u_2 = \frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1).$$

Подставляя это выражение для u_2 в уравнение энергии, получим:

$$\frac{m_1}{2}(v_1^2 - u_1^2) = \frac{m_2}{2}\left[\frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)\right]^2.$$

Одним из решений этого уравнения является решение $u_1 = v_1$ и $u_2 = 0$. Но этот ответ нас не интересует, так как равенство $u_1 = v_1$ и $u_2 = 0$ показывает, что шары вовсе не сталкивались. Поэтому ищем другое решение уравнения. Сократив на $m_1(v_1 - u_1)$, получим:

$$\frac{1}{2}(v_1 + u_1) = \frac{1}{2}\cdot\frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1),$$

т. е.

$$m_2 v_1 + m_2 u_1 = m_1 v_1 - m_1 u_1$$

или

$$(m_1 - m_2)v_1 = (m_1 + m_2)u_1,$$

что дает следующее значение для скорости первого шара после удара:

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}v_1.$$

При лобовом столкновении с неподвижным шаром налетающий шар отскакивает обратно (u_1 отрицательно), если его масса меньше. Если m_1 больше m_2, то оба шара продолжают движение в направлении удара.

При биллиардной игре в случае точного лобового удара часто наблюдается такая картина: шар-снаряд резко останавливается, шар-мишень отправляется в лузу. Это объясняется только что найденным уравнением. Массы шаров равны, и

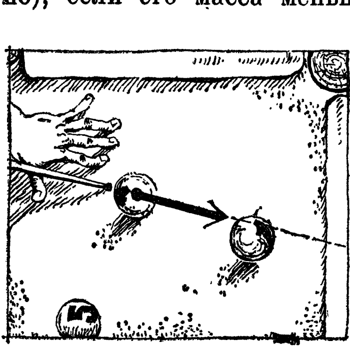


Рис. 3.11.

уравнение дает $u_1=0$, а значит, $u_2=v_1$. Налетающий шар останавливается, а второй шар начинает движение со скоростью налетевшего. Шары как бы меняются скоростями.

Рассмотрим еще один пример столкновения тел по закону упругого удара, а именно косой удар тел равной массы (рис. 3.11). Второе тело до удара покоилось, поэтому законы сохранения импульса и энергии имеют вид

$$m\boldsymbol{v}_1 = m\boldsymbol{u}_1 + m\boldsymbol{u}_2, \quad \frac{mv_1^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}.$$

Сократив на массу, получим:

$$\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{u}_1 + \boldsymbol{u}_2, \quad v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Вектор $\boldsymbol{v}_1$ есть векторная сумма $\boldsymbol{u}_1$ и $\boldsymbol{u}_2$. Но ведь это означает, что длины векторов-скоростей образуют треугольник.

Что же это за треугольник? Вспомним теорему Пифагора. Ее выражает наше второе уравнение. Это значит, что треугольник скоростей должен быть прямоугольным с гипотенузой $\boldsymbol{v}_1$ и катетами $\boldsymbol{u}_1$ и $\boldsymbol{u}_2$. Значит, $\boldsymbol{u}_1$ и $\boldsymbol{u}_2$ образуют между собой прямой угол. Этот интересный результат показывает, что при любом косом упругом ударе тела равной массы разлетаются под прямым углом.

Глава 4

КОЛЕБАНИЯ

РАВНОВЕСИЕ

В некоторых случаях равновесие очень трудно поддержать — попробуйте пройтись по натянутому канату. В то же время никто не награждает аплодисментами сидящего в кресле-качалке. А ведь он тоже поддерживает свое равновесие.

В чем же разница в этих двух примерах? В каком случае равновесие устанавливается «само собой»?

Условие равновесия как будто бы очевидно. Чтобы тело не смещалось из своего положения, действующие на него силы должны уравновешиваться; иными словами, сумма этих сил должна равняться нулю. Это условие действительно необходимо для равновесия тела, но достаточно ли оно?

На рис. 4.1 изображен профиль горки, которую нетрудно соорудить из картона. Шарик будет вести себя по-разному в зависимости от того, на какое место горки его положить. В любой точке на склоне горы на шарик будет действовать сила, которая заставит его покатиться вниз. Этой действующей силой является сила тяжести, вернее ее проекция на направление касательной линии к профилю горки, проведенной в точке, которая нас интересует. Понятно поэтому, что чем более пологий склон, тем меньше будет действующая на шарик сила.

Нас прежде всего интересуют те точки, в которых сила тяжести полностью уравновешивается реакцией опоры, а значит результирующая сила, действующая на шарик, равна нулю. Это условие будет соблюдено на вершинах горки и в нижних точках — ложбинках.

Касательные к этим точкам горизонтальны, и результирующие силы, действующие на шарик, равны нулю.

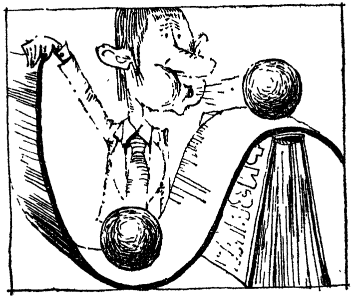


Рис. 4.1.

Однако на вершинах, несмотря на то, что результирующая сила равна нулю, шарик расположить не удастся, а если и удастся, то мы сразу обнаружим побочную причину этой удачи — трение. Небольшой толчок или легкое дуновение преодолеют силы трения, шарик стронется с места и покатится вниз.

Для гладкого шарика на гладкой горке положением равновесия будут только низкие точки ложбинок. Если толчком или струей воздуха вывести шарик из этого положения, шарик вернется в него сам по себе.

В ложбине, ямке, углублении тело, несомненно, находится в равновесии. Отклонившись от этого положения, тело попадает под действие силы, возвращающей его обратно. В положениях на вершинах горки картина другая: если тело отошло от этого положения, то на него действует не возвращающая, а «удаляющая» сила. Следовательно, результирующая сила, равная нулю, — необходимое, но не достаточное условие устойчивого равновесия.

Равновесие шарика на горке можно рассматривать и с другой точки зрения. Места ложбинок соответствуют минимумам, а места вершин — максимумам потенциальной энергии. Изменению положений, в которых потенциальная энергия минимальна, препятствует закон сохранения энергии. Такое изменение сделало бы кинетическую энергию отрицательной, а это невозможно. Совсем иначе обстоит дело в точках вершин. Уход из этих точек связан с уменьшением потенциальной энергии, а значит, не с уменьшением, а с увеличением кинетической энергии.

Итак, в положении равновесия потенциальная энергия должна иметь минимальное значение по сравнению с ее значениями в соседних точках.

Чем глубже ямка, тем больше устойчивость. Закон сохранения энергии нам известен, поэтому можно сразу сказать, при каких условиях тело выкатится из углубления. Для этого нужно сообщить телу кинетическую энергию, которой хватило бы для поднятия его до борта ямки. Чем яма глубже, тем бóльшая кинетическая энергия нужна для нарушения устойчивого равновесия.

ПРОСТЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Если толкнуть шарик, лежащий в углублении, он начнет двигаться в гору, постепенно теряя кинетическую энергию. Когда она будет потеряна полностью, произойдет мгновенная остановка и начнется движение вниз. Теперь уже потенциальная энергия будет переходить в кинетическую. Шарик наберет скорость, проскочит положение равновесия по инерции и опять начнет подъем, только в противоположную сторону. Если трение незначительно, то такое движение «вверх — вниз» может продолжаться очень долго, а в идеальном случае — при отсутствии трения — оно будет длиться вечно.

Таким образом, движения вблизи положения устойчивого равновесия всегда имеют колебательный характер.

Для изучения колебания, пожалуй, более пригоден маятник, чем шарик, перекатывающийся в ямке. Хотя бы потому, что у маятника легче свести к минимуму трение.

Когда грузик маятника отклонен в крайнее положение, скорость и кинетическая энергия его равны нулю. Потенциальная энергия в этот момент наибольшая. Грузик идет вниз — потенциальная энергия уменьшается и переходит в кинетическую. Значит, и скорость движения возрастает. Когда грузик проходит наинизшее положение, его потенциальная энергия наименьшая и соответственно кинетическая энергия и скорость максимальны. При дальнейшем движении грузик снова поднимается. Теперь скорость убывает, потенциальная энергия возрастает.

Если отвлечься от потерь на трение, то грузик отклонится на такое же расстояние вправо, на какое он первоначально был отклонен влево. Потенциальная энергия перешла в кинетическую, а затем в том же количестве создалась «новая» потенциальная энергия. Мы описали первую половину одного колебания. Вторая половина протекает так же, только грузик движется в обратную сторону.

Колебательное движение является движением повторяющимся, или, как говорят, периодическим. Возвращаясь к исходной точке, грузик каждый раз повторяет свое движение (если не учитывать изменений в результате трения) как в отношении пути, так и в отношении скорости и ускорения. Время, затрачиваемое на одно колебание, т. е. на возвращение в исходную точку, одинаково для первого, второго и всех последующих колебаний. Это время — одна из важнейших характеристик колебания — называется периодом, мы будем обозначать его буквой T. Через время T движение повторяется, т. е. через время T мы всегда найдем колеблющееся тело в том же месте пространства и движущимся в ту же сторону. Через полпериода смещение тела, а также направление движения изменят знак. Так как период T есть время одного колебания, то число n колебаний в единицу времени будет равно $1/T$.

От чего же зависит период колебания тела, движущегося вблизи положения устойчивого равновесия? В частности, от чего зависит период колебания маятника? Первым поставил и решил этот вопрос Галилей. Формулу периода колебания маятника мы сейчас выведем.

Однако трудно элементарным путем применять законы механики к неравномерно-ускоренному движению. Поэтому, чтобы обойти эту трудность, заставим грузик маятника не колебаться в вертикальной плоскости, а описывать окружность, оставаясь все время на одной высоте. Такое движение создать нетрудно, надо лишь дать начальный толчок отведенному от положения равновесия маятнику точно в направлении, перпендикулярном к радиусу отклонения, и подобрать силу этого толчка.

На рис. 4.2 изображен такой «круговой маятник».

Грузик с массой m движется по кругу. Значит, кроме силы тяжести mg, на него действует центробеж-

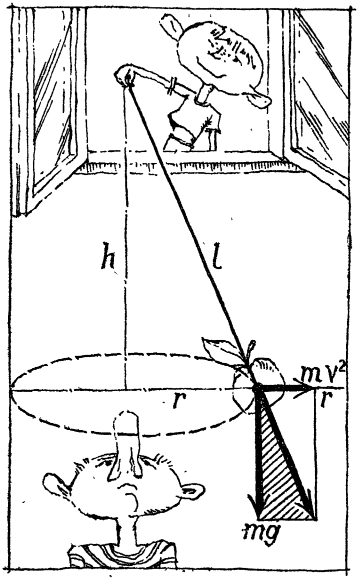


Рис. 4.2.

ная сила mv^2/r, которую мы можем представить и в виде $4\pi^2n^2rm$. Здесь n — число оборотов в секунду. Поэтому выражение для центробежной силы можно записать и так: $m4\pi^2r/T^2$. Равнодействующая этих двух сил натягивает нить маятника.

На рисунке заштрихованы два подобных треугольника — треугольники сил и расстояний. Отношения соответствующих катетов равны, значит,

$$mgT^2/m4\pi^2r = h/r,$$

или

$$T = 2\pi\sqrt{h/g}.$$

От каких же причин зависит период колебания маятника? Если мы производим опыты в одном и том же месте земного шара (g не меняется), то период колебания зависит лишь от разности высот точки подвеса и точки нахождения груза. Масса груза, как и всегда при движениях в поле тяжести, не сказывается на периоде колебания.

Интересно следующее обстоятельство. Мы изучаем движение вблизи положения устойчивого равновесия. При малых же отклонениях разность высот h мы можем заменить длиной маятника l. Легко проверить это. Если длина маятника 1 м, а радиус отклонения 1 см, то

$$h = \sqrt{10\,000 - 1} = 99{,}995 \text{ см}.$$

Различие между h и l в 1% наступит лишь при отклонении в 14 см. Таким образом, период свободных колебаний маятника для не слишком больших отклонений от положения равновесия равен

$$T = 2\pi\sqrt{l/g},$$

т. е. зависит лишь от длины маятника и значения ускорения свободного падения в том месте, где производится опыт, но не зависит от величины отклонения маятника от положения равновесия.

Формула $T=2\pi\sqrt{l/g}$ доказана для кругового маятника; а какова же она будет для обыкновенного «плоского»? Оказывается, формула сохраняет свой вид. Доказывать это строго мы не будем, но обратим внимание на то, что тень грузика, отбрасываемая на стену круговым маятником, колеблется почти так же, как плоский маятник: тень совершает одно колебание как раз за то время, пока шарик опишет окружность.

Использование малых колебаний около положения равновесия позволяет произвести измерение времени с очень большой точностью.

Согласно преданию, Галилей установил независимость периода колебания маятника от амплитуды и массы, наблюдая во время богослужения в соборе за тем, как раскачиваются две огромные люстры.

Итак, период колебания маятника пропорционален корню квадратному из его длины. Так, период колебания метрового маятника в два раза больше периода колебания маятника длиной 25 см. Из формулы периода колебания маятника далее следует, что один и тот же маятник будет колебаться не одинаково быстро на разных земных широтах. По мере продвижения к экватору ускорение свободного падения уменьшается, и период колебания растет.

Период колебания можно измерить с очень большой точностью. Поэтому опыты с маятниками дают возможность очень точно измерять ускорение свободного падения.

РАЗВЕРТКА КОЛЕБАНИЙ

Прикрепим к нижней части грузика маятника мягкий грифелек и подвесим маятник над листом бумаги так, чтобы грифель касался бумаги (рис. 4.3). Теперь слегка отклоним маятник. Качающийся грифелек прочертит на бумаге небольшой отрезок прямой линии. В середине качания, когда маятник проходит положение равновесия, карандашная линия будет пожирнее, так как в этом положении грифелек сильнее нажимает на бумагу. Если потянуть лист бумаги в направлении,

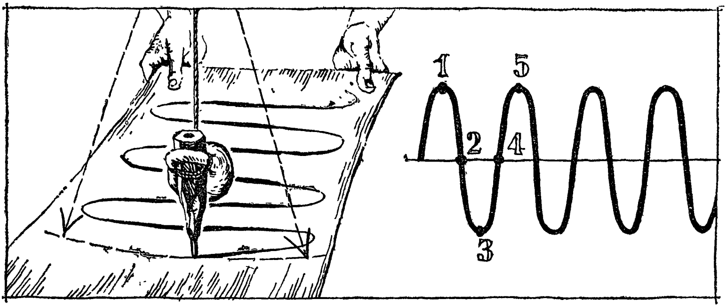


Рис. 4.3.

перпендикулярном к плоскости колебания, то прочертится кривая, изображенная на рис. 4.3. Нетрудно сообразить, что получившиеся волночки будут расположены густо, если бумагу тянуть медленно, и редко, если лист бумаги движется со значительной скоростью. Чтобы кривая получилась аккуратной, как на рисунке, нужно, чтобы лист бумаги двигался строго равномерно.

Этим способом мы как бы «развернули» колебания.

Развертывание нужно для того, чтобы сказать, где находился и куда двигался грузик маятника в тот или иной момент времени. Представьте себе, что бумага движется со скоростью 1 см/с с момента, когда маятник находился в крайнем положении, например слева, от средней точки. На нашем графике это начальное положение соответствует точке, помеченной цифрой *1*. Через 1/4 периода маятник будет проходить через среднюю точку. За это время бумага продвинется на число сантиметров, равное $\frac{1}{4}T$ — точка *2* на рисунке. Теперь маятник движется вправо, одновременно ползет и бумага. Когда маятник придет в правое крайнее положение, бумага продвинется на число сантиметров, равное $\frac{1}{2}T$, — точка *3* на рисунке. Маятник вновь идет к средней точке и попадает через $\frac{3}{4}T$ в положение равновесия — точка *4* на чертеже. Точка *5* завершает полное колебание, и дальше явление повторяется через каждые T секунд или через каждые T сантиметров на графике.

Таким образом, вертикальная линия на графике — это шкала смещений точки от положения равновесия, горизонтальная средняя линия — это шкала времени.

Из такого графика легко находятся две величины, исчерпывающим образом характеризующие колебание. Период определяется как расстояние между двумя равнозначными точками, например между двумя ближайшими вершинами. Также сразу измеряется наибольшее смещение точки от положения равновесия. Это смещение называется амплитудой колебания.

Развертка колебания позволяет нам, кроме того, ответить на поставленный выше вопрос: где находится колеблющаяся точка в тот или иной момент времени. Например, где будет колеблющаяся точка через 11 с, если период колебания равен 3 с, а движение началось в крайнем положении слева? Через каждые 3 с колебание начинается с той же точки. Значит, через 9 с тело также будет в крайнем левом положении.

Нет нужды поэтому в графике, на котором кривая протянута на несколько периодов,— вполне достаточен чертеж, на котором изображена кривая, соответствующая одному колебанию. Состояние колеблющейся точки через 11 с при периоде 3 с будет такое же, как и через 2 с. Отложив на чертеже 2 см (мы ведь условились, что скорость протягивания бумаги равна 1 см/с, иными словами, что масштаб чертежа — 1 см равен 1 с), мы увидим, что через 11 с точка находится на пути из крайнего правого положения в положение равновесия. Смещение в этот момент находим из рисунка.

Для нахождения смещения точки, совершающей малые колебания около положения равновесия, не обязательно прибегать к графику. Теория показывает, что в этом случае кривая зависимости смещения от времени представляет собой синусоиду. Если смещение точки обозначить через y, амплитуду через a, период колебания через T, то значение смещения через время t после начала колебания найдем по формуле

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Колебание, происходящее по такому закону, называется гармоническим. Аргумент синуса равен про-

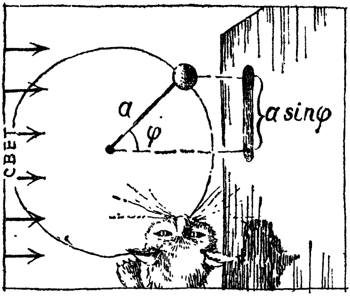


Рис. 4.4.

изведению 2π на t/T. Величина $2\pi t/T$ называется фазой.

Имея под руками тригонометрические таблицы и зная период и амплитуду, легко вычислить смещение точки и по значению фазы сообразить, в какую сторону точка движется.

Нетрудно вывести формулу колебательного движения, рассматривая движение тени, отбрасываемой на стенку грузиком, движущимся по окружности (рис. 4.4).

Смещения тени мы будем откладывать от среднего положения. В крайних положениях смещение y равняется радиусу круга a. Это амплитуда колебания тени.

Если от среднего положения грузик прошел по окружности угол φ, то его тень отойдет от средней точки на величину $a \sin \varphi$.

Пусть период движения грузика (являющийся, конечно, и периодом колебания тени) есть T; это значит, что 2π радиан грузик проходит за время T. Можно составить пропорцию $\varphi/t = 2\pi/T$, где t — время поворота на угол φ.

Таким образом, $\varphi = \frac{2\pi}{T} t$ и $y = a \sin \frac{2\pi}{T} t$. Это мы и хотели доказать.

Скорость колеблющейся точки также меняется по закону синуса. К такому заключению нас приведет то же рассуждение о движении тени грузика, описывающего окружность. Скорость этого грузика есть вектор неизменной длины v_0. Вектор скорости вращается вместе с грузиком. Представим мысленно вектор скорости как материальную стрелку, способную отбрасывать тень. В крайних положениях грузика вектор расположится вдоль луча света и тени не даст. Когда грузик от крайнего положения пройдет по окружности угол θ, то вектор скорости повернется на тот же угол и его проекция будет равна $v_0 \sin\theta$. Но по тем же основаниям, что и раньше, $\theta/t = 2\pi/T$, а значит, мгновенное значение скорости колеблющегося тела

$$v = v_0 \sin\frac{2\pi}{T}t.$$

Обратим внимание на то, что в формуле для определения смещения отсчет времени ведется от среднего положения, а в формуле скорости — от крайнего положения. Смещение маятника равно нулю при среднем положении грузика, а скорость колебания — при крайнем положении.

Между амплитудой скорости колебания v_0 (иногда говорят — амплитудным значением скорости) и амплитудой смещения имеется простая связь: окружность длиной $2\pi a$ грузик описывает за время, равное периоду колебания T. Таким образом,

$$v_0 = \frac{2\pi a}{T} \quad \text{и} \quad v = \frac{2\pi a}{T}\sin\frac{2\pi}{T}t.$$

СИЛА И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

При всяком колебании около положения равновесия на тело действует сила, «желающая» возвратить тело в положение равновесия. Когда точка удаляется от положения равновесия, сила замедляет движение, когда точка приближается к этому положению, сила ускоряет движение.

Проследим за этой силой на примере маятника (рис. 4.5). Грузик маятника находится под действием силы тяжести и силы натяжения нити. Разложим силу тяжести на две составляющие — одну, направленную вдоль нити, и другую, идущую перпендикулярно к ней по касательной к траектории. Для движения существенна лишь касательная составляющая силы тяжести. Она-то и есть в этом случае возвращающая сила. Что касается силы, направленной вдоль нити, то она уравновешивается противодействием со стороны гвоздика, на котором висит маятник, и принимать ее в расчет надо лишь тогда, когда нас интересует вопрос, выдержит ли нить тяжесть колеблющегося тела.

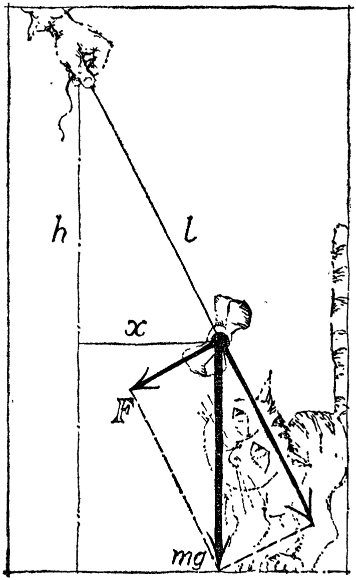


Рис. 4.5.

Обозначим через x величину смещения грузика. Перемещение происходит по дуге, но мы ведь условились изучать колебания вблизи положения равновесия. Поэтому мы не делаем различия между смещением по дуге и отклонением груза от вертикали. Рассмотрим два подобных треугольника. Отношение соответствующих катетов равно отношению гипотенуз, т. е.

$$F/x = mg/l$$

или

$$F = (mg/l)\,x.$$

Величина mg/l во время колебания не меняется. Эту постоянную величину мы обозначим буквой k, тогда возвращающая сила $F=kx$. Мы приходим к следующему важному выводу: возвращающая сила прямо пропорциональна смещению колеблющейся точки от положения равновесия. Возвращающая сила максимальна в крайних положениях колеблющегося тела. Когда тело проходит среднюю точку, сила обращается в нуль и меняет свой знак или, иными словами, свое направление. Пока тело смещено вправо, сила направлена влево, и наоборот.

Маятник служит простейшим примером колеблющегося тела. Однако мы заинтересованы в том, чтобы формулы и законы, которые мы находим, можно было бы распространить на любые колебания.

Период колебания маятника был выражен через его длину. Такая формула годится лишь для маятника. Но мы можем выразить период свободных колебаний через постоянную возвращающей силы k. Так как $k=mg/l$, то $l/g=m/k$, и, следовательно,

$$T = 2\pi\sqrt{m/k}.$$

Эта формула распространяется на все случаи колебания, так как любое свободное колебание происходит под действием возвращающей силы.

Выразим теперь потенциальную энергию маятника через смещение из положения равновесия x. Потенциальная энергия грузика, когда он проходит низшую точку, может быть принята за нуль, и отсчет высоты подъема следует вести от этой точки. Обозначив буквой h разность высот точки подвеса и положения отклонившегося груза, запишем выражение потенциальной энергии: $U=mg(l-h)$ или, пользуясь формулой разности квадратов,

$$U=mg\frac{l^2-h^2}{l+h}.$$

Но, как видно из рисунка, $l^2-h^2=x^2$, l и h различаются весьма мало, и поэтому вместо $l+h$ можно подставить $2l$. Тогда $U=\frac{mg}{2l}x^2$, или

$$U=\frac{kx^2}{2},$$

Потенциальная энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату смещения тела из положения равновесия.

Проверим правильность выведенной формулы. Потеря потенциальной энергии должна равняться работе возвращающей силы. Рассмотрим два положения тела — x_2 и x_1. Разность потенциальных энергий

$$U_2-U_1=\frac{kx_2^2}{2}-\frac{kx_1^2}{2}=\frac{k}{2}(x_2^2-x_1^2).$$

Но разность квадратов можно записать как произведение суммы на разность. Значит,

$$U_2-U_1=\frac{k}{2}(x_2+x_1)(x_2-x_1)=\frac{kx_2+kx_1}{2}(x_2-x_1).$$

Но x_2-x_1 есть путь, пройденный телом, kx_1 и kx_2 — значения возвращающей силы в начале и в конце движения, а $\frac{kx_1+kx_2}{2}$ равно средней силе.

Наша формула привела нас к правильному результату: потеря потенциальной энергии равна произведенной работе.

КОЛЕБАНИЯ ПРУЖИН

Легко заставить колебаться шарик, подвесив его на пружину. Закрепим один конец пружины и оттянем шарик (рис. 4.6). В растянутом состоянии пружина находится, пока мы оттягиваем шарик рукой. Если отпустить руку, пружина будет сокращаться, и шарик начнет движение к положению равновесия. Так же, как и маятник, пружина приходит в состояние покоя не сразу. По инерции будет пройдено положение равновесия, и пружина начнет сжиматься. Движение шарика замедляется и в какой-то момент он останавливается, чтобы тут же начать движение в обратную сторону. Возникает колебание с теми же типичными признаками, с которыми мы ознакомились, изучая маятник.

При отсутствии трения колебание продолжалось бы без конца. При наличии трения колебания затухают, и при этом тем быстрее, чем больше трение.

Зачастую роли пружины и маятника аналогичны. И та, и другой служат для поддержания постоянства периода в часах. Точный ход современных пружинных часов обеспечивается колебательным движением маленького махового колеса-баланса. В колебание его приводит пружина, которая свертывается и развертывается десятки тысяч раз в сутки.

У шарика на нитке роль возвращающей силы играла касательная составляющая силы тяжести. У шарика на пружине возвращающей силой является сила упругости сжатой или растянутой пружины. Таким образом, величина упругой силы прямо пропорциональна смещению: $F=kx$

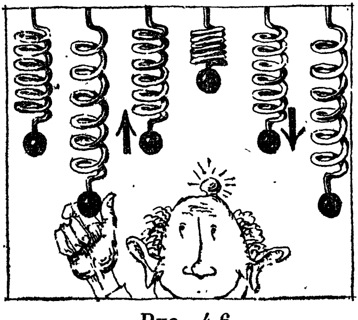


Рис. 4.6.

Коэффициент k имеет в данном случае другой смысл. Теперь это жесткость пружины. Жесткая пружина — это та, которую трудно растянуть или сжать. Именно такой смысл и имеет коэффициент k. Из формулы ясно: k равно силе, необходимой для растяжения или сжатия пружины на единицу длины.

Зная жесткость пружины и массу подвешенного к ней груза, мы найдем при помощи формулы $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ период свободного колебания. Например, груз с массой 10 г на пружине с жесткостью 10^5 дин/см (это довольно жесткая пружина — стограммовая гиря растянет ее на 1 см) будет совершать колебания с периодом $T=6{,}28\cdot10^{-2}$ с. В одну секунду будет происходить 16 колебаний.

Чем мягче пружина, тем медленнее происходит колебание. В том же направлении влияет и увеличение массы груза.

Применим к шарику на пружинке закон сохранения энергии.

Мы знаем, что для маятника сумма кинетической и потенциальной энергий $K+U$ не изменяется

$$K+U \text{ сохраняется.}$$

Значения K и U для маятника нам известны. Закон сохранения энергии говорит, что

$$\frac{mv^2}{2}+\frac{kx^2}{2} \text{ сохраняется.}$$

Но то же самое верно и для шарика на пружинке.

Вывод, который мы неизбежно должны сделать, весьма интересен.

Кроме потенциальной энергии, с которой мы познакомились раньше, существует, таким образом, потенциальная энергия и другого рода. Первая называется потенциальной энергией тяготения Если бы пружина была расположена горизонтально, то потенциальная энергия тяготения во время колебания, конечно, не менялась бы. Новая потенциальная энергия, обнаруженная нами, называется потенциальной энергией упругости. В нашем случае она и равна $kx^2/2$, т. е зависит от жесткости пружины и прямо пропорциональна квадрату величины сжатия или растяжения.

Сохраняющаяся неизменной полная энергия колебаний может быть записана в виде $E=ka^2/2$, или $E=mv_0^2/2$.

Величины a и v_0, входящие в последние формулы, представляют собой максимальные значения, которые принимают смещение и скорость во время колебания,— это амплитудные значения смещения и скорости. Происхождение этих формул вполне понятно. В крайнем положении, когда $x=a$, кинетическая энергия колебания равна нулю и полная энергия равна значению потенциальной энергии. В среднем положении смещение точки от положения равновесия, а следовательно, и потенциальная энергия равны нулю, скорость в этот момент максимальна, $v=v_0$ и полная энергия равна кинетической.

Учение о колебаниях — обширный раздел физики. С маятниками и пружинками довольно часто приходится иметь дело. Но, конечно, этим не исчерпывается список тел, колебания которых приходится изучать. Колеблются фундаменты, на которых установлены машины, могут прийти в колебание мосты, части зданий, балки, провода высокого напряжения. Звук — это колебания воздуха.

Мы перечислили некоторые примеры механических колебаний. Однако понятие колебания может быть отнесено не только к механическим смещениям тел или частиц от положения равновесия. Во многих электрических явлениях мы тоже сталкиваемся с колебаниями, причем эти колебания происходят по законам, очень похожим на те, которые мы рассмотрели выше. Учение о колебаниях пронизывает все области физики.

БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

То, что говорилось до сих пор, относится к колебаниям вблизи положения равновесия, происходящим под действием возвращающей силы, величина которой прямо пропорциональна смещению точки от положения равновесия. Такие колебания происходят по закону синуса. Они называются гармоническими. Период гармонических колебаний не зависит от амплитуды.

Значительно сложнее колебания с большим размахом. Такие колебания происходят уже не по закону синуса, а развертка их дает более сложные кривые, различные для разных колеблющихся систем. Период

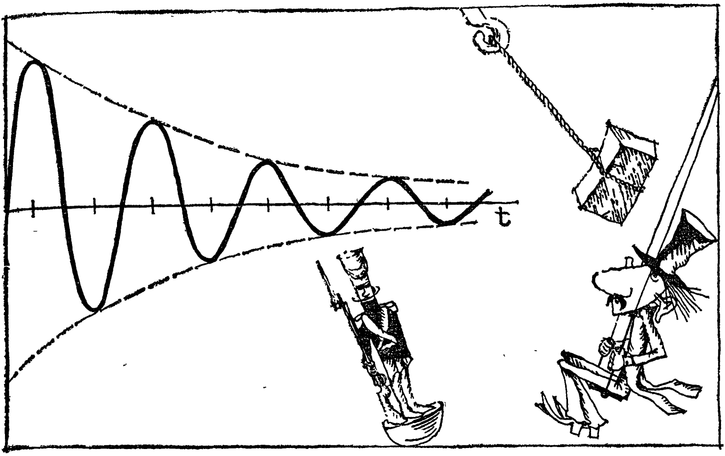


Рис. 4.7.

перестает быть характерным свойством колебания и начинает зависеть от амплитуды.

Трение существенно изменяет любые колебания. При наличии трения колебания постепенно затухают. Чем сильнее трение, тем затухание происходит быстрее. Попробуйте заставить колебаться маятник, погруженный в воду. Вряд ли удастся добиться, чтобы этот маятник совершил больше одного-двух колебаний. Если погрузить маятник в очень вязкую среду, то колебания может и вовсе не быть. Отклоненный маятник просто вернется в положение равновесия. На рис. 4.7. показан типичный график затухающего колебания. По вертикали отложено отклонение от положения равновесия, а по горизонтали — время. Амплитуда (максимальный размах) затухающего колебания уменьшается с каждым колебанием.

РЕЗОНАНС

Ребенка посадили на качели. Он не достает ногами до земли. Чтобы раскачать его, можно, конечно, высоко поднять качели и потом отпустить. Но это довольно тяжело, да в этом и нет необходимости: доста-

Рис. 4.8.

точно слегка толкать качели в такт колебаниям, и через короткое время качели сильно раскачаются.

Для того чтобы раскачать тело, надо действовать в такт колебаниям. Иначе говоря, надо сделать так, чтобы толчки происходили с тем же периодом, что и собственные колебания тела. В подобных случаях говорят о резонансе.

Явление резонанса, широко распространенное в природе и технике, заслуживает внимательного рассмотрения.

Очень занятное и своеобразное явление резонанса вы можете наблюдать, если сделаете следующее приспособление. Протяните горизонтальную нить и подвесьте на нее три маятника (рис. 4.8) — два коротких одинаковой длины и один подлиннее. Теперь отклоните и отпустите один из коротких маятников. Через несколько секунд вы увидите, как другой маятник, такой же длины, постепенно тоже начинает колебаться. Еще несколько секунд — и второй короткий маятник раскачается, так что уже нельзя будет узнать, какой из двух начал движение первым.

В чем дело? Маятники одинаковой длины имеют одинаковые собственные периоды колебаний. Первый маятник раскачивает второй. Колебания передаются от одного к другому через связывающую их нить. Да, но ведь на нитке висит еще один маятник, другой длины. А что будет с ним? С ним ничего не произойдет. Период этого маятника другой, и короткому маятнику не удастся его раскачать. Третий маятник будет присутствовать при интересном явлении «переливания» энергии от одного маятника к другому, не принимая в этом никакого участия.

С явлениями механического резонанса сталкивался нередко каждый из нас. Может быть, вы только не обращали на него внимания. Хотя иногда резонанс бывает очень надоедливым. Мимо ваших окон проехал трамвай, а в буфете зазвенела посуда. В чем дело? Колебания почвы передались зданию, а с ним вместе и полу вашей комнаты, пришел в колебание буфет и посуда в нем. Так далеко и через столько предметов распространилось колебание. Это произошло благодаря резонансу. Внешние колебания попали в резонанс с собственными колебаниями тел. Почти любое дребезжание, которое мы слышим в комнате, на заводе, в автомашине, происходит благодаря резонансу.

Явление резонанса, как, впрочем, многие явления, может быть и полезным и вредным.

Машина стоит на фундаменте. Мерно, с определенным периодом, ходят ее движущиеся части. Представьте, что этот период совпадает с собственным периодом фундамента. Что получится? Фундамент довольно быстро раскачается, и дело может кончиться плохо.

Известен такой факт. В Петербурге по мосту шла в ногу рота солдат. Мост рухнул. По делу началось следствие. Казалось, не было оснований беспокоиться за судьбу моста и людей: сколько раз на этом мосту собирались толпы людей, медленно проезжали тяжелые повозки, во много раз превышавшие вес роты солдат.

Но под действием тяжести мост прогибается на незначительную величину. Несравнимо большего прогиба можно достигнуть, если мост раскачать. Резонансная амплитуда колебания может быть в тысячи раз больше, чем смещение под действием такой же неподвижной нагрузки. Именно это и показало следствие — собственный период колебания моста совпадал с периодом обычного строевого шага.

Поэтому, когда воинское подразделение переходит мост, дается команда идти вольно. Если движение людей не будет согласованным, то явление резонанса не наступит, и мост не раскачается. Впрочем, этот несчастный случай инженеры хорошо запомнили. При проектировании мостов они стараются сделать так, чтобы период свободных колебаний моста был далек от периода строевого шага.

Так же точно поступают и конструкторы фундаментов для машин. Они стараются сделать фундамент таким, чтобы его период колебаний лежал подальше от периода колебаний движущихся частей машины.

Глава 5

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

МОМЕНТ СИЛЫ

Попробуйте рукой привести во вращение тяжелое маховое колесо. Тяните за спицу. Вам будет тяжело, если вы ухватитесь рукой слишком близко к оси. Переместите руку к ободу, и дело пойдет легче.

Что же изменилось? Ведь сила в обоих случаях одна и та же. Изменилась точка приложения силы.

Во всем предыдущем изложении вопрос о месте приложения силы не возникал, так как в рассмотренных задачах форма и размер тела роли не играли. По сути дела мы мысленно заменяли тело точкой.

Пример с вращением колеса показывает, что вопрос о точке приложения силы далеко не праздный, когда речь идет о вращении или повороте тела.

Для того чтобы понять роль точки приложения силы, вычислим работу, которую надо проделать, чтобы повернуть тело на некоторый угол. При этом расчете, конечно, предполагается, что все частички твердого тела жестко сцеплены между собой (мы оставляем пока без внимания способность тела гнуться, сжиматься — вообще менять свою форму). Поэтому сила, приложенная к одной точке тела, сообщает кинетическую энергию всем его частям.

При вычислении этой работы роль точки приложения сил отчетливо видна.

На рис. 5.1 показано закрепленное на оси тело. При повороте тела на маленький угол φ точка приложения силы переместилась по дуге — прошла путь s.

Проектируя силу на направление движения, т. е. на касательную к окружности, по которой движется точка приложения, напишем знакомое выражение работы A:

$$A = F_{\text{прод}} \cdot s.$$

Но дуга s может быть представлена как

$$s = r\varphi,$$

где r — расстояние от оси вращения до точки приложения силы. Итак,

$$A = F_{\text{прод}} \cdot r\varphi.$$

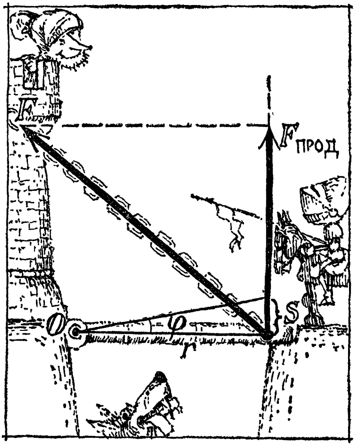


Рис. 5.1.

Поворачивая тело на один и тот же угол разными способами, мы можем затратить различную работу в зависимости от того, где приложена сила.

Если угол задан, то работа определяется произведением $F_{\text{прод}} \cdot r$. Такое произведение называют моментом силы:

$$M = F_{\text{прод}} \cdot r.$$

Формуле момента силы можно придать другой вид. Пусть O — ось вращения и B — точка приложения силы (рис. 5.2). Буквой d обозначена длина перпендикуляра, опущенного из O на направление силы. Два треугольника, построенные на рисунке, подобны. Поэтому

$$F/F_{\text{прод}} = r/d \quad \text{или} \quad F_{\text{прод}} \cdot r = Fd.$$

Величина d называется плечом силы.

Новая формула $M = Fd$ читается так: момент силы равен произведению силы на ее плечо.

Если точку приложения силы перемещать вдоль направления силы, то плечо d, а вместе с ним и момент силы M не будут меняться. Значит, безразлично, где именно на линии силы лежит точка приложения.

При помощи нового понятия формула для работы запишется короче:

$$A = M\varphi,$$

т. е. работа равняется произведению момента силы на угол поворота.

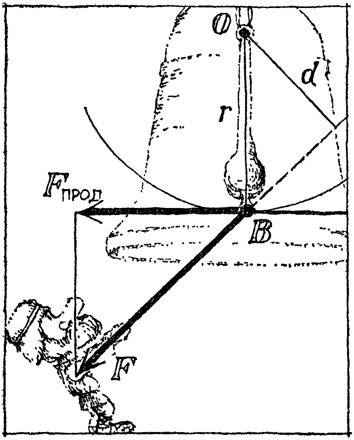


Рис. 5.2.

Пусть на тело действуют две силы с моментами M_1 и M_2. При повороте тела на угол φ будет совершена работа $M_1\varphi + M_2\varphi = (M_1 + M_2)\varphi$. Эта краткая запись показывает, что две силы с моментами M_1 и M_2 вращают тело так, как это делала бы одна сила с моментом M, равным сумме $M_1 + M_2$. Моменты сил могут как помогать, так и мешать друг другу. Если моменты M_1 и M_2 стремятся повернуть тело в одну и ту же сторону, то мы должны считать их величинами, имеющими одинаковый алгебраический знак. Напротив, моменты сил, поворачивающие тело в разные стороны, имеют разные знаки.

Как мы знаем, работа всех сил, действующих на тело, идет на изменение кинетической энергии.

Вращение тела замедлилось или ускорилось — значит, изменилась его кинетическая энергия. Это может произойти лишь в том случае, если суммарный момент сил не равен нулю.

А если суммарный момент равен нулю? Ответ ясен — кинетическая энергия не изменяется, следовательно, тело или вращается равномерно по инерции, или покоится.

Итак, равновесие способного вращаться тела требует уравновешивания действующих на него моментов сил. Если действуют две силы, равновесие требует равенства

$$M_1 + M_2 = 0.$$

Пока нас интересовали такие задачи, в которых тело можно было рассматривать как точку, условия равновесия были проще: чтобы тело покоилось или двигалось равномерно, говорил закон Ньютона для таких задач, надо, чтобы результирующая сила равнялась нулю; силы, действующие вверх, должны уравновеситься силами, направленными вниз; сила вправо должна компенсироваться силой влево.

Этот закон действителен и для нашего случая. Если маховое колесо находится в покое, то действующие на него силы уравновешиваются реакцией оси, на которую насажено колесо.

Но этих необходимых условий становится недостаточно. Кроме уравновешивания сил требуется еще уравновешивание моментов сил. Уравновешивание моментов является вторым необходимым условием покоя или равномерного вращения твердого тела.

Моменты сил, если их много, без труда разбиваются на две группы: одни стремятся вращать тело вправо, другие — влево. Эти-то моменты и должны компенсироваться.

РЫЧАГ

Может ли человек удержать на весу 100 тонн, можно ли рукой расплющить железо, может ли ребенок оказать противодействие силачу? Да, могут.

Предложите сильному человеку повернуть влево маховое колесо, ухватившись за спицу рукой у самой оси. Момент силы в данном случае будет невелик: сила большая, но плечо мало. Если ребенок будет тянуть колесо в обратную сторону, ухватившись за спицу у обода, то момент силы может оказаться и большим: сила мала, зато плечо велико. Условием равновесия будет

$$M_1 = M_2, \quad \text{или} \quad F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Используя закон моментов, можно придать человеку сказочную силу.

Наиболее ярким примером служит действие рычагов.

Вы хотите поднять ломом громадный камень. Эта задача окажется вам под силу, хотя масса камня — несколько тонн. Лом положен на опору и представляет собой твердое тело нашей задачи. Точка опоры есть центр вращения. На тело действуют два момента сил: мешающий — от веса камня и подталкивающий — от руки. Если индекс *1* отнести к мускульной силе, а индекс *2* — к тяжести камня, то возможность поднять камень выразится кратко: M_1 должно быть больше M_2.

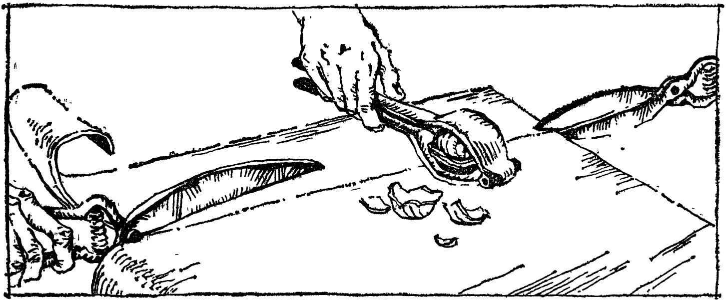


Рис. 5.3.

Поддерживать камень на весу можно при условии

$$M_1 = M_2, \quad \text{т. е.} \quad F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Если малое плечо — от опоры до камня — в 15 раз меньше большого плеча — от опоры до руки,— то камень весом в 1 тонну будет удерживать в приподнятом состоянии человек, действующий всем своим весом на длинный конец рычага.

Лом, положенный на опору,— весьма распространенный и самый простой пример рычага. Выигрыш в силе с помощью лома бывает обычно в 10—20 раз. Длина лома около 1,5 м, а точку опоры обычно трудно установить ближе, чем в 10 см от конца. Поэтому одно плечо будет больше другого в 15—20 раз, а значит, таким же будет и выигрыш в силе.

Автомашину массой в несколько тонн шофер легко приподнимает при помощи домкрата. Домкрат — рычаг такого же типа, как лом, положенный на опору. Точки приложения сил (рука, автомобиль) лежат по обе стороны от точки опоры рычага домкрата. Здесь выигрыш в силе примерно в 40—50 раз, что дает возможность легко поднять огромную тяжесть.

Ножницы, щипцы для орехов, плоскогубцы, клещи, кусачки и многие другие инструменты — все это рычаги. На рис. 5.3 вы легко найдете центр вращения твердого тела (точку опоры) и точки приложения двух сил — действующей и мешающей.

Когда ножницами режут жесть, стараются раскрыть их как можно шире. Что этим достигается? Кусок ме-

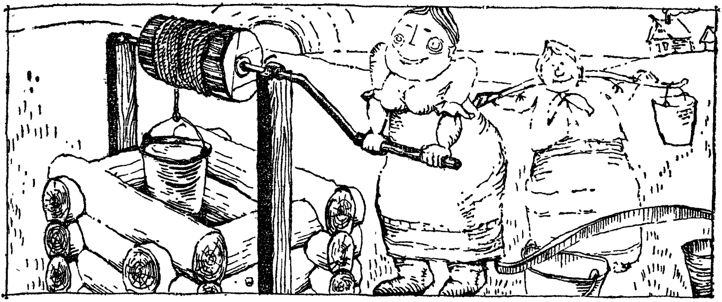


Рис. 5.4.

талла удается подсунуть поближе к центру вращения. Плечо преодолеваемого момента сил становится меньше, а выигрыш в силе, значит, больше. Сдвигая колечки ножниц или ручки кусачек, взрослый человек действует обычно силой в 40—50 кгс. Одно плечо может превысить другое раз в 20. Оказывается, мы способны вгрызаться в металл с силой в 1000 кгс. И это при помощи столь несложных инструментов.

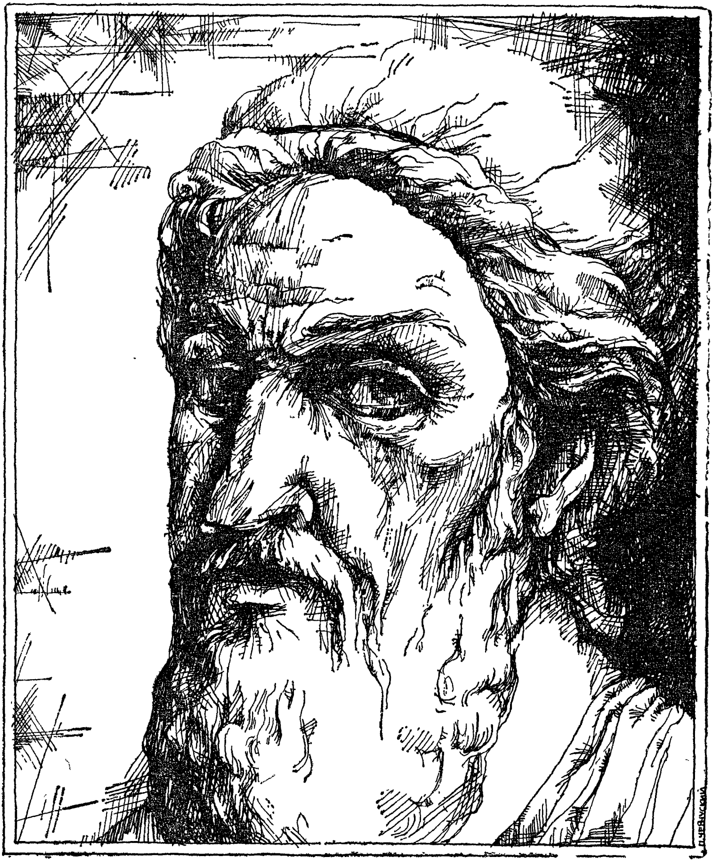
Разновидностью рычага является ворот. При помощи ворота (рис. 5.4) во многих деревнях вытаскивают воду из колодца.

ПРОИГРЫШ В ПУТИ

Инструменты делают человека сильным, однако из этого совсем не следует, что инструменты позволяют потратить мало работы и получить много. Закон сохранения энергии убеждает, что выигрыш в работе, т. е. создание работы из «ничего», есть вещь невозможная.

Работа полученная не может быть больше затраченной. Напротив, неизбежные потери энергии на трение приведут к тому, что полученная при помощи инструмента работа всегда будет меньше затраченной. В идеальном случае эти работы могут быть равными.

Собственно говоря, мы напрасно теряем время на разъяснение этой очевидной истины: ведь правило моментов было выведено из условия равенства работ действующей и преодолеваемой силы.



АРХИМЕД (около 287—212 г. до н.э.) — величайший математик, физик и инженер древности. Архимед вычислил объем и поверхность шара и его частей, цилиндра и тел, образованных вращением эллипса, гиперболы и параболы. Он впервые со значительной точностью вычислил отношение длины окружности к ее диаметру, показав, что оно заключено в пределах $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$. В механике им были установлены законы рычага, условия плавания тел («закон Архимеда»), законы сложения параллельных сил. Архимед изобрел машину для подъема воды («архимедов винт», и в наше время применяющийся для транспортировки сыпучих и вязких грузов), системы рычагов и блоков для поднятия больших тяжестей и военные метательные машины, успешно действовавшие во время осады его родного города Сиракуз римлянами.

Если точки приложения сил прошли пути s_1 и s_2, то условие равенства работ запишется так:

$$F_1^{\text{прод}} s_1 = F_2^{\text{прод}} s_2.$$

Преодолевая при помощи рычажного инструмента какую-либо силу F_2 на пути s_2, мы можем проделать это силой F_1, много меньшей F_2. Но перемещение руки s_1 должно быть во столько же раз больше s_2, во сколько раз мускульная сила F_1 меньше F_2.

Часто этот закон выражают короткой фразой: выигрыш в силе равен проигрышу в пути.

Правило рычага было открыто величайшим ученым древности — Архимедом. Увлеченный силой доказательств, этот замечательный ученый древности писал сиракузскому царю Герону: «Если бы была другая Земля, я перешел бы на нее и сдвинул бы нашу Землю». Очень длинный рычаг, точка опоры которого близка к земному шару, кажется, дал бы возможность решить такую задачу.

Мы не станем горевать с Архимедом об отсутствии точки опоры, которой, как он думал, ему только и недоставало, чтобы сместить земной шар.

Пофанатазируем: возьмем крепчайший рычаг, положим его на опору и на короткий конец «подвесим маленький шарик» весом в ... $6 \cdot 10^{24}$ кгс. Эта скромная цифра показывает, сколько весит земной шар, «сжатый в маленький шарик». Теперь к длинному концу рычага приложим мускульную силу.

Если силу руки Архимеда считать за 60 кгс, то для смещения «земляного орешка» на 1 см руке Архимеда придется проделать путь в $\frac{6 \cdot 10^{24}}{60} = 10^{23}$ раз больше. 10^{23} см — это 10^{18} км, что в три миллиарда раз больше диаметра земной орбиты!

Этот анекдотический пример отчетливо показывает масштабы «проигрыша в пути» при работе рычага.

Любой из примеров, рассмотренных нами выше, можно использовать как иллюстрацию не только выигрыша в силе, но и проигрыша в пути. Рука шофера, качающая домкрат, совершит путь, который будет во столько же раз больше величины подъема автомашины, во сколько раз мускульная сила меньше веса автомашины. Сдвигая колечки ножниц, чтобы разрезать лист жести, мы проделаем работу на пути, во столько же раз большем глубины прореза, во сколько мускульная сила меньше сопротивления жести. Камень, подымаемый ломом, поднимется на высоту, во столько же раз меньшую высоты, на которую опускается рука, во сколько раз сила мускулов меньше веса камня. Это правило делает понятным принцип действия винта. Представим себе, что болт с шагом резьбы в 1 мм мы завинчиваем при помощи гаечного ключа длиной 30 см. Винт за один оборот переместится вдоль оси на 1 мм, а наша рука за это же время пройдет путь в 2 м. Мы выигрываем в силе в 2 тысячи раз и либо надежно скрепляем детали, либо легким усилием руки передвигаем большие тяжести.

ДРУГИЕ ПРОСТЕЙШИЕ МАШИНЫ

Проигрыш в пути как оплата выигрыша в силе есть общий закон не только рычажных инструментов, но и любых других приспособлений и механизмов, используемых человеком.

Для поднятия грузов широко применяются тали. Так называется система нескольких подвижных блоков, соединенных с одним или несколькими неподвижными блоками. На рис. 5.5 груз висит на шести веревках. Понятно, что вес распределяется, и натяжение веревки будет в шесть раз меньше веса. Подъем груза массой в тонну потребует приложения силы в $1000/6=167$ кгс. Однако нетрудно сообразить, что для подъема груза на 1 м придется выбрать 6 м веревки. Для подъема груза на 1 м нужно 1000 кгс·м работы. Эту работу мы должны доставить в «любом виде» — сила в $1000/6$ кгс должна действовать на пути 6 м, сила в 10 кгс — на пути в 100 м, сила в 1 кгс — на пути в 1 км.

Наклонная плоскость, о которой мы упоминали на стр. 30, также представляет собой приспособление, позволяющее выиграть в силе, проигрывая в пути.

Своеобразным способом умножения силы является удар. Удар молотком, топором, таран, да и просто удар кулаком может создать огромную силу. Секрет сильного удара несложен. Забивая молотком гвоздь в неподатливую стену, нужно как следует размахнуться.

Большой размах, т. е. большой путь, на котором действует сила, порождает значительную кинетическую энергию молотка. Отдается эта энергия на малом пути. Если размах 1/2 м, а гвоздь вошел в стену на 1/2 см, то сила умножилась в 100 раз. Но если стена тверже и гвоздь при том же размахе руки вошел в стенку на 1/2 мм, то удар будет в 10 раз сильнее, чем в первом случае. В твердую стенку гвоздь войдет не так глубоко, и та же работа потеряется на меньшем пути. Выходит, что молоток работает, как автомат: бьет сильнее там, где труднее.

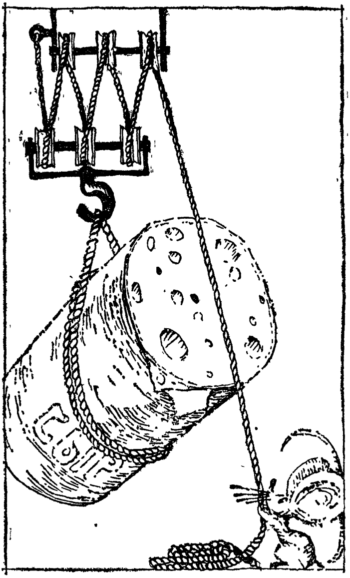


Рис. 5.5.

Если «разгонять» молоток массой в килограмм, то он ударит по гвоздю с силой в 100 кгс. А раскалывая дрова тяжелым колуном, мы ломаем дерево с силой в несколько тысяч кгс. Тяжелые кузнечные молоты падают с небольшой высоты — порядка одного метра. Расплющивая поковку на 1—2 мм, молот массой в 1000 кг обрушивается на нее с огромной силой — в 10^6 кгс.

КАК СКЛАДЫВАТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Когда на предыдущих страницах мы решали задачи механики, в которых тело мысленно заменялось точкой, вопрос о сложении сил решался просто. Правило параллелограмма давало ответ на этот вопрос, а если силы были параллельны, то мы складывали их величины как числа.

Теперь дело обстоит сложнее. Ведь воздействие силы на предмет характеризуется не только ее величиной и направлением, но и точкой ее приложения, или — мы

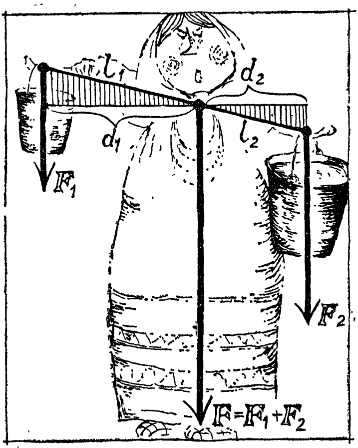


Рис. 5.6.

пояснили выше, что это одно и то же — линией действия силы.

Сложить силы — значит заменить их одной. Это возможно далеко не всегда.

Замена параллельных сил одной равнодействующей — задача, осуществимая всегда (за исключением одного особого случая, о котором будет сказано в конце этого параграфа). Рассмотрим сложение параллельных сил. Конечно, сумма сил в 3 кгс и 5 кгс равна 8 кгс, если силы смотрят в одну сторону. Задача состоит в том, чтобы найти точку приложения (линию действия) равнодействующей силы.

На рис. 5.6 изображены две действующие на тело силы. Суммарная сила F заменяет силы F_1 и F_2, но это значит не только то, что $F=F_1+F_2$; действие силы F будет равноценно действию F_1 и F_2 в том случае, если и момент силы F будет равен сумме моментов F_1 и F_2.

Мы ищем линию действия суммарной силы F. Конечно, она параллельна силам F_1 и F_2, но на каких расстояниях проходит эта линия от сил F_1 и F_2?

В качестве точки приложения силы F на рисунке изображена точка, которая лежит на отрезке, соединяющем точки приложения сил F_1 и F_2. По отношению к выбранной точке момент F, разумеется, равен нулю. Но тогда сумма моментов F_1 и F_2 по отношению к этой точке тоже должна равняться нулю, т. е. моменты сил F_1 и F_2, противоположные по знаку, будут равны по величине.

Обозначив буквами d_1 и d_2 плечи сил F_1 и F_2, можем записать это условие так:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2, \quad \text{или} \quad F_1/F_2 = d_2/d_1.$$

Из подобия заштрихованных треугольников следует, что $d_2/d_1 = l_2/l_1$, т. е. точка приложения суммарной силы на соединительном отрезке делит расстояние между складываемыми силами на части l_1 и l_2, обратно пропорциональные силам.

Обозначим буквой l расстояние между точками приложения сил F_1 и F_2. Очевидно $l=l_1+l_2$.

Решаем систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$F_1 l_1 - F_2 l_2 = 0,$$
$$l_1 + l_2 = l.$$

Получим:

$$l_1 = \frac{F_2 l}{F_1 + F_2}, \quad l_2 = \frac{F_1 l}{F_1 + F_2}.$$

По этим формулам мы можем найти точку приложения равнодействующей силы не только в том случае, когда силы смотрят в одну сторону, но и в случае с силами, направленными в противоположные стороны (как говорят, антипараллельными). Если силы направлены в разные стороны, то они имеют противоположные знаки, и равнодействующая равна разности сил $F_1 - F_2$, а не их сумме. Считая отрицательной меньшую из двух сил F_2, видим по нашим формулам, что l_1 становится отрицательным. Это значит, что точка приложения силы F_1 лежит не левее (как ранее), а правее точки приложения равнодействующей (рис. 5.7), при этом по-прежнему

$$F_1/F_2 = l_2/l_1.$$

Интересный результат получается при равных антипараллельных силах. Тогда $F_1+F_2=0$. Формулы показывают, что l_1 и l_2 становятся при этом бесконечно большими. Какой же физический смысл имеет это утверждение? Так как относить результирующую в бесконечность бессмысленно, то, значит, равные антипараллельные силы нельзя заменить одной. Такую комбинацию сил называют парой сил.

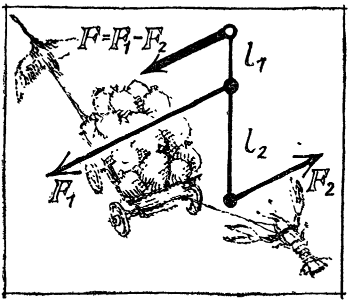


Рис. 5.7.

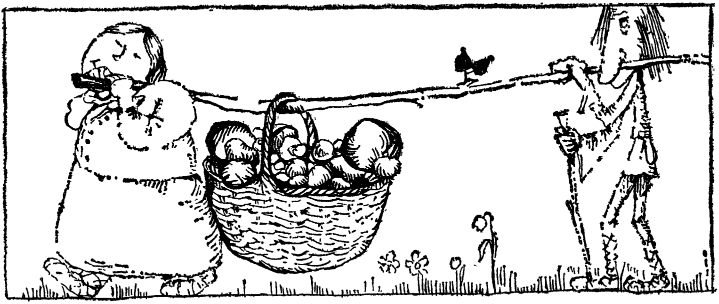


Рис. 5.8.

Действие пары сил нельзя свести к действию одной силы. Любые две параллельные или антипараллельные силы можно уравновесить одной, а пару сил — нельзя.

Разумеется, было бы неверным сказать, что силы, составляющие пару, уничтожают одна другую. Пара сил оказывает весьма существенное действие — вращает тело; особенность действия пары сил состоит в том, что она не дает поступательного движения.

В некоторых случаях может возникнуть вопрос не о сложении параллельных сил, а о разложении данной силы на две параллельные.

На рис. 5.8 изображены два человека, которые вместе несут на палке тяжелую корзину. Вес корзины раскладывается на обоих. Если груз давит на середину палки, то они оба испытывают одинаковую тяжесть. Если расстояние от точки приложения груза до рук, которые его несут, d_1 и d_2, то сила F разложится на силы F_1 и F_2 по правилу

$$F_1/F_2 = d_2/d_1.$$

Кто сильнее, тот должен взяться за палку поближе к грузу.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ

Все частички тела обладают весом. Поэтому твердое тело находится под действием бесчисленного количества сил тяжести. При этом все эти силы параллельны. Если так, то их можно сложить по правилам, которые мы только что рассматривали, и заменить одной силой. Точка приложения суммарной силы называется центром тяжести. В этой точке как бы сосредоточен вес тела.

Подвесим тело за одну из его точек. Как оно при этом расположится? Поскольку мы можем мысленно заменить тело одним сосредоточенным в центре тяжести грузом, ясно, что в равновесии этот груз будет лежать на вертикали, проходящей через точку опоры. Другими словами, в равновесии центр тяжести лежит на вертикали, проходящей через точку опоры, и находится в самом низком положении.

Можно расположить центр тяжести на вертикали, проходящей через ось, и над точкой опоры. Это удастся сделать с большим трудом и только благодаря наличию трения. Такое равновесие неустойчиво.

Мы уже говорили об условии устойчивого равновесия — потенциальная энергия должна быть минимальна. Так оно и есть в том случае, когда центр тяжести лежит ниже точки опоры. Любое отклонение повышает центр тяжести и, значит, увеличивает потенциальную энергию. Напротив, когда центр тяжести лежит над точкой опоры, то любое дуновение, выводящее тело из этого положения, ведет к уменьшению потенциальной энергии. Такое положение неустойчиво.

Вырежем из картона фигуру. Для того чтобы найти центр ее тяжести, подвесим ее два раза, приклеивая нитку-подвес сначала в одной, а потом в другой точке тела. Закрепим фигуру на оси, проходящей через центр тяжести. Повернем фигуру в одно положение, второе, третье... Мы обнаружим полное безразличие тела к нашим операциям. В любом положении осуществляется специальный случай равновесия. Его так и называют — безразличным.

Причина этого ясна — при любом положении фигуры заменяющая ее материальная точка находится в одном и том же месте.

В ряде случаев центр тяжести можно найти и без опыта и вычислений. Ясно, например, что центры тяжести шара, круга, квадрата, прямоугольника находятся в центрах этих фигур, так как они симметричны. Если мысленно разбить симметричное тело на частички, то каждой из них будет соответствовать другая, расположенная симметрично по другую сторону от центра. А для каждой пары таких частиц центр фигуры явится центром тяжести.

У треугольника центр тяжести лежит на пересечении медиан. Действительно, разобьем треугольник на узенькие полоски, параллельные одной из сторон. Медиана делит пополам каждую из полосок. Но центр тяжести полоски лежит, конечно, посередине полоски, т. е. на медиане. Центры тяжести всех полосок попадают на медиану, и когда мы будем складывать их силы веса, мы придем к выводу, что центр тяжести треугольника лежит где-то на медиане. Но это рассуждение верно в отношении любой из медиан. Поэтому центр тяжести должен лежать на их пересечении.

Но, может быть, вы не уверены, что три медианы пересекаются в одной точке. Это доказывается в геометрии; но наше рассуждение тоже доказывает эту интересную теорему. Ведь у тела не может быть нескольких центров тяжести; а раз он один и лежит на медиане, из какого бы угла мы ее ни провели, то значит, все три медианы пересекаются в одной точке. Постановка физического вопроса помогла нам доказать геометрическую теорему.

Труднее найти центр тяжести однородного конуса. Из соображений симметрии ясно только, что центр тяжести лежит на осевой линии. Расчет показывает, что он находится на расстоянии 1/4 высоты от основания. Центр тяжести не обязательно находится внутри тела. Например, центр тяжести кольца находится в его центре, т. е. вне кольца.

Можно ли устойчиво поставить на стеклянной подставке булавку в вертикальном положении?

На рис. 5.9 показано, как это сделать. Небольшое сооружение из проволоки в виде двойного коромысла с четырьмя маленькими грузиками надо жестко прикрепить к булавке. Так как грузики подвешены ниже опоры, а вес булавки мал, то центр тяжести лежит ниже точки опоры. Положение устойчиво.

До сих пор речь шла о телах, имевших точку опоры. А что будет, если тело опирается на целую площадку?

Ясно, что в этом случае расположение центра тяжести над опорой вовсе не говорит о неустойчивости равновесия. Как иначе могли бы стоять стаканы на столе? Для устойчивости нужно, чтобы линия действия силы тяжести, проведенная из центра тяжести, проходила через площадь опоры. Наоборот, если линия действия силы проходит вне площади опоры, то тело падает.

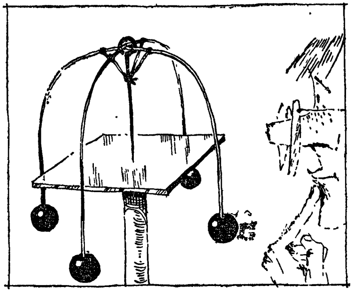


Рис. 5.9.

Степень устойчивости может быть очень различной в зависимости от того, как высоко расположен центр тяжести над опорой. Стакан с чаем опрокинет только очень неловкий человек, а вот цветочную вазу с маленьким основанием можно опрокинуть неосторожным прикосновением. В чем здесь дело? Взгляните на рис. 5.10. К центрам тяжести двух ваз приложены одинаковые горизонтальные силы. Ваза, изображенная справа, перевернется, так как суммарная сила не проходит через основание вазы, а направлена в сторону.

Мы сказали, что для устойчивости тела приложенная к нему сила должна пройти через площадь опоры. Но площадь опоры, нужная для равновесия, не всегда соответствует фактической площади опоры. На рис. 5.11 изображено тело, площадь опоры которого имеет форму полумесяца. Легко сообразить, что устойчивость тела не изменится, если полумесяц дополнить до сплошного

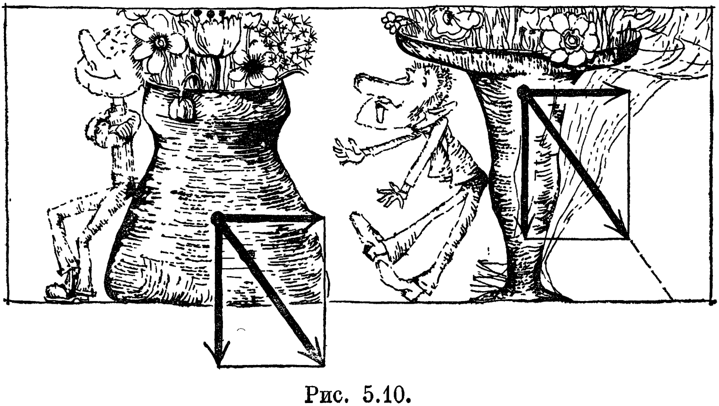


Рис. 5.10.

Рис. 5.11.

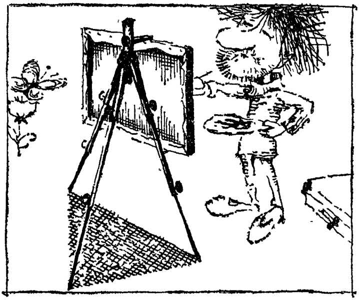


Рис. 5.12.

полукруга. Таким образом, площадь опоры, определяющая условие равновесия, может быть больше фактической.

Чтобы найти опорную площадь для изображенного на рис. 5.12 треножника, надо его концы соединить отрезками прямых.

Почему так трудно ходить по канату? Потому, что площадь опоры резко уменьшается. Ходить по канату нелегко, и не даром награждают аплодисментами искусного канатоходца. Однако иногда зрители впадают в ошибку и признают за вершину искусства хитрые трюки, облегчающие задачу. Артист берет сильно изогнутое коромысло с двумя ведрами воды; ведра оказываются на уровне каната. С серьезным лицом, при замолкшем оркестре, артист совершает переход по канату. Как усложнен трюк, думает неопытный зритель. На самом же деле артист облегчил свою задачу, понизив центр тяжести.

ЦЕНТР ИНЕРЦИИ

Вполне законно задать вопрос: где находится центр тяжести группы тел? Если на плоту много людей, то от места нахождения их общего центра тяжести (вместе с плотом) будет зависеть устойчивость плота.

Смысл понятия остается тем же. Центр тяжести есть точка приложения суммы сил тяжести всех тел рассматриваемой группы.

Для двух тел результат подсчета нам известен. Если два тела весом F_1 и F_2 находятся на расстоянии x, то центр тяжести находится на расстоянии x_1 от первого и x_2 от второго тела, причем

$$x_1 + x_2 = x \quad \text{и} \quad F_1/F_2 = x_2/x_1.$$

Так как вес может быть представлен как произведение mg, то центр тяжести пары тел удовлетворяет условию

$$m_1x_1 = m_2x_2,$$

т. е. лежит в точке, которая делит расстояние между массами на отрезки, обратно пропорциональные массам.

Вспомним теперь стрельбу из установленного на платформе орудия. Импульсы орудия и снаряда равны и направлены в разные стороны. Имеют место равенства:

$$m_1v_1 = m_2v_2 \quad \text{или} \quad v_2/v_1 = m_1/m_2,$$

причем отношение скоростей сохраняет это значение в течение всего времени взаимодействия. Во время движения, возникшего благодаря отдаче, орудие и снаряд смещаются по отношению к начальному положению на расстояния x_1 и x_2 в разные стороны. Расстояния x_1 и x_2 — пути, проходимые обоими телами,— растут, но при неизменном отношении скоростей величины x_1 и x_2 будут также все время находиться в том же отношении:

$$x_2/x_1 = m_1/m_2 \quad \text{или} \quad x_1m_1 = x_2m_2.$$

Здесь x_1 и x_2 есть расстояния орудия и снаряда от первоначальной точки их нахождения. Сравнивая эту формулу с формулой, определяющей положение центра тяжести, мы видим их полную тождественность. Отсюда непосредственно следует, что центр тяжести снаряда и орудия все время после выстрела остается в первоначальной точке их нахождения.

Другими словами, мы пришли к очень интересному результату — центр тяжести орудия и снаряда после выстрела продолжает покоиться.

Такой вывод верен всегда: если центр тяжести двух тел первоначально покоился, то их взаимодействие —

какой бы характер оно ни носило — не может изменить положения центра тяжести. Именно поэтому нельзя поднять самого себя за волосы или подтянуться к Луне методом французского писателя Сирано де Бержерака, предложившего (конечно, шутя) для этой цели взять в руки кусок железа и подбрасывать вверх магнит, который притягивал бы это железо.

Покоящийся центр тяжести с точки зрения другой инерциальной системы равномерно движется. Значит, центр тяжести либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

Сказанное о центре тяжести двух тел верно и для группы многих тел. Конечно, для изолированной группы тел,— мы это оговариваем всегда, когда применяется закон сохранения импульса.

Значит, у всякой группы взаимодействующих тел есть такая точка, которая покоится или движется равномерно, и эта точка есть их центр тяжести.

Желая подчеркнуть новое свойство этой точки, ей дают еще одно название: центр инерции. Ведь, скажем, о тяжести Солнечной системы (а значит, и о центре тяжести) может идти речь лишь в условном смысле.

Как бы ни двигались тела, образующие замкнутую группу, центр инерции (тяжести) будет покоиться или в иной системе отсчета двигаться по инерции.

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА

Сейчас мы познакомимся еще с одним механическим понятием, которое позволяет сформулировать новый для нас важный закон движения.

Это понятие называется моментом импульса, или моментом количества движения. Уже названия подсказывают, что речь идет о величине, чем-то похожей на момент силы.

Момент импульса, так же как и момент силы, требует указания точки, по отношению к которой он определяется. Чтобы определить момент импульса относительно какой-либо точки, надо построить вектор импульса и опустить из точки перпендикуляр на его направление. Произведение импульса mv на плечо d

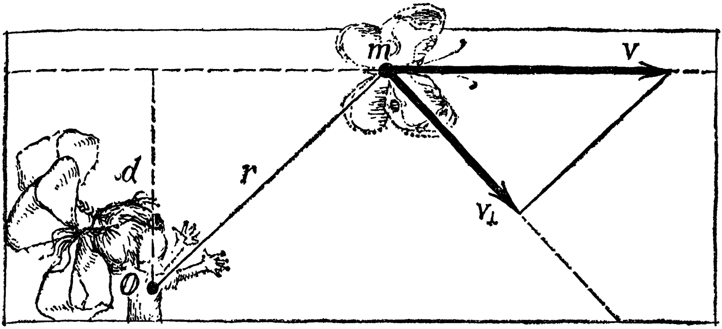


Рис. 5.13.

и есть момент импульса, который мы будем обозначать буквой N:

$$N = mvd.$$

Если тело движется свободно, то его скорость не меняется; остается неизменным и плечо по отношению к любой точке, так как движение происходит по прямой линии. Значит, и момент импульса остается при таком движении неизменным.

Так же как и для момента силы, для момента импульса можно написать и другую формулу. Соединим радиусом местоположение тела с точкой, момент по отношению к которой нас интересует (рис. 5.13). Построим также проекцию скорости на направление, перпендикулярное к радиусу. Из подобных треугольников, которые построены на рисунке, следует: $v/v_\perp = r/d$. Значит, $vd = v_\perp r$, и формула для момента импульса может быть записана и в таком виде: $N = mv_\perp r$.

При свободном движении, как мы только что сказали, момент импульса остается неизменным. Ну, а если на тело действует сила? Расчет показывает, что изменение момента импульса за одну секунду равно моменту силы.

Полученный закон без труда распространяется и на систему тел. Если сложить изменения в единицу времени моментов импульсов всех тел, входящих в систему, то сумма их окажется равной сумме моментов сил, действующих на тела. Значит, для группы тел справедливо положение: изменение суммарного момента импульса за единицу времени равно сумме моментов всех сил.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Если связать два камня веревкой и с силой бросить один из них, то второй камень полетит вдогонку за первым на натянутой веревке. Один камень будет обгонять второй, перемещение вперед будет сопровождаться вращением. Забудем про поле тяготения — пусть бросок произведен в межзвездном пространстве.

Силы, действующие на камни, равны друг другу и направлены навстречу вдоль веревки (это ведь силы действия и противодействия). Но тогда и плечи обоих сил по отношению к любой точке будут одинаковы. Равные плечи и равные, но противоположные по направлению силы дают равные и противоположные по знаку моменты сил.

Суммарный момент сил будет равен нулю. Но отсюда следует, что будет равно нулю и изменение момента импульса, т. е. что момент импульса такой системы остается постоянным.

Веревка, связывающая камни, понадобилась нам для наглядности. Закон сохранения момента импульса справедлив для любой пары взаимодействующих тел, какую бы природу ни имело это взаимодействие.

Да и не только для пары. Если изучается замкнутая система тел, то силы, действующие между телами, всегда можно разбить на равное количество сил действия и противодействия, моменты которых будут попарно уничтожаться.

Закон сохранения суммарного момента импульса универсален, верен для любой замкнутой системы тел.

Если тело вращается вокруг оси, то его момент импульса равен

$$N = mvr,$$

где m — масса тела, v — скорость и r — расстояние тела от оси. Выражая скорость через число оборотов в секунду n, имеем:

$$v = 2\pi nr \quad \text{и} \quad N = 2\pi mnr^2,$$

т. е. момент импульса тела пропорционален квадрату расстояния от оси.

Сядьте на табуретку с вращающимся сидением. Возьмите в руки тяжелые гири, широко расставьте руки и попросите кого-нибудь привести вас в медленное вращение. Теперь быстрым движением прижмите руки к груди — вы неожиданно начнете вращаться быстрее. Руки в стороны — движение замедлится, руки к груди — движение ускорится. Пока из-за трения табуретка не перестанет вращаться, вы успеете несколько раз изменить свою скорость вращения.

Отчего это происходит?

Момент импульса при неизменном количестве оборотов в случае приближения гирь к оси упал бы. Для того чтобы «скомпенсировать» это уменьшение, и увеличивается скорость вращения.

Успешно используют закон сохранения момента импульса акробаты. Как акробат выполняет «сальто» — переворачивание в воздухе? Прежде всего — толчок от пружинящего настила или от руки партнера. При толчке тело наклонено вперед, и вес вместе с силой толчка создают мгновенный момент силы. Сила толчка создает движение вперед, а момент силы обусловливает вращение. Однако это вращение медленное, оно не произведет впечатления на зрителя. Акробат поджимает колени. «Собирая свое тело» поближе к оси вращения, акробат значительно увеличивает скорость вращения и быстро переворачивается. Такова механика «сальто».

На этом же принципе основаны движения балерины, совершающей быстрые, следующие один за другим повороты. Обычно начальный момент импульса придает балерине ее партнер. В этот момент корпус танцовщицы наклонен; начинается медленное вращение, затем изящное и быстрое движение — балерина выпрямляется. Теперь все точки тела находятся ближе к оси вращения, и сохранение момента импульса приводит к резкому увеличению скорости.

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА КАК ВЕКТОР

До сих пор речь шла о величине момента импульса. Но момент импульса является вектором.

Рассмотрим вращение точки по отношению к какому-либо «центру». На рис. 5.14 изображены два близких

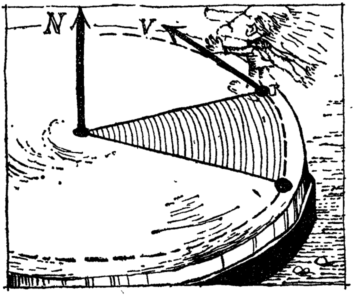


Рис. 5.14.

положения точки. Интересующее нас движение характеризуется моментом импульса и плоскостью, в которой оно происходит. Плоскость движения заштрихована на рисунке — это площадь, пройденная радиусом, приведенным из «центра» к движущейся точке.

Можно объединить сведения о направлении плоскости движения и о моменте импульса. Для этого служит вектор момента импульса, направленный вдоль нормали к плоскости движения и равный по величине абсолютному значению момента импульса. Однако это еще не все — нужно учесть направление движения в плоскости: ведь тело может поворачиваться около центра как по часовой стрелке, так и против нее.

Принято рисовать вектор момента импульса таким образом, чтобы, смотря против вектора, видеть поворот точки против часовой стрелки. Можно сказать и иначе: направление вектора момента импульса связано с направлением поворота так, как направление ввинчивающегося штопора связано с направлением движения его ручки.

Таким образом, если мы знаем вектор момента импульса, мы можем судить о величине момента импульса, о положении плоскости движения в пространстве и о направлении поворота по отношению к «центру».

Если движение происходит в одной и той же плоскости, но плечо и скорость меняются, то вектор момента импульса сохраняет свое направление в пространстве, но меняется по длине. А в случае произвольного движения вектор импульса меняется как по величине, так и по направлению.

Может показаться, что такое объединение в одном понятии направления плоскости движения и величины момента импульса служит лишь целям экономии слов. В действительности, однако, когда мы имеем дело с системой тел, которые движутся не в одной плоскости, мы получим закон сохранения момента импульса только тогда, когда будем складывать моменты импульсов как векторы.

Это обстоятельство и показывает, что приписывание векторного характера моменту импульса имеет глубокое содержание.

Момент импульса всегда определяется относительно какого-либо условно выбранного «центра». Естественно, что его величина, вообще говоря, зависит от выбора этой точки. Можно, однако, показать, что если рассматриваемая нами система тел как целое покоится (ее полный импульс равен нулю), то вектор момента импульса не зависит от выбора «центра». Этот момент импульса можно назвать внутренним моментом импульса системы тел.

Закон сохранения вектора момента импульса — третий и последний в механике закон сохранения. Однако мы не вполне точны, когда говорим о трех законах сохранения. Ведь импульс и момент импульса — это векторные величины, а закон сохранения векторной величины означает, что неизменной остается не только числовое значение величины, но и ее направление, иначе говоря, неизменными остаются три составляющих вектора по трем взаимно перпендикулярным направлениям в пространстве. Энергия — скалярная величина, импульс — векторная, момент импульса — также векторная. Поэтому точнее будет сказать, что в механике имеют место семь законов сохранения.

ВОЛЧКИ

Попробуйте поставить тарелку дном на тонкую трость и удержать ее в положении равновесия. Ничего не получится. Однако такой трюк является излюбленным номером китайских жонглеров. Им удается выполнить эту задачу, действуя одновременно с несколькими тросточками. Жонглер вовсе не старается удержать тонкие палочки в вертикальном положении. Кажется чудом, что тарелки, слегка опираясь на концы горизонтально наклоненных палок, не падают и почти висят в воздухе.

Если вам придется наблюдать за работой жонглеров вблизи, то обратите внимание на одну важнейшую вещь: жонглер закручивает тарелки так, чтобы они быстро вращались в своей плоскости.

Жонглируя булавами, кольцами, шляпами,— во всех случаях артист придает им вращение. Только в этом случае предметы возвращаются к нему в руки в том же положении, которое им было придано вначале.

В чем причина такой устойчивости вращения? Она связана с законом сохранения момента. Ведь при изменении направления оси вращения изменяется и направление вектора вращательного момента. Как нужна сила для изменения направления скорости, так нужен момент силы для изменения направления вращения, тем больший, чем быстрее вращается тело.

Стремление быстро вращающегося тела сохранять неизменным направление оси вращения может быть прослежено во многих случаях, подобных упомянутым. Так, вращающийся волчок не опрокидывается даже в том случае, если его ось наклонена.

Попробуйте рукой опрокинуть вертящийся волчок; оказывается, с ним не так-то легко справиться.

Устойчивость вращающегося тела используется в артиллерии. Вы слыхали, вероятно, что в стволе орудия делаются винтовые нарезы. Вылетающий снаряд вращается вокруг своей оси и благодаря этому не «кувыркается» в воздухе. Нарезное орудие дает несравненно лучшую прицельность и бóльшую дальность полета, чем ненарезное.

Летчику и морскому навигатору необходимо всегда знать, где находится истинная земная вертикаль по отношению к положению самолета или морского судна в данный момент. Использование отвеса не годится для этой цели, так как при ускоренном движении отвес отклоняется. Поэтому применяют быстро вращающийся волчок особой конструкции — его называют гирогоризонтом. Если установить его ось вращения на земную вертикаль, то она в таком положении и останется, как бы ни изменил самолет свое положение в пространстве.

Но на чем стоит волчок? Если он находится на подставке, которая поворачивается вместе с самолетом, то как же ось вращения сможет сохранить свое направление?

Подставкой служит устройство типа так называемого карданова подвеса (рис. 5.15). В этом устройстве при минимальном трении в опорах волчок может вести себя так, как будто он подвешен в воздухе.

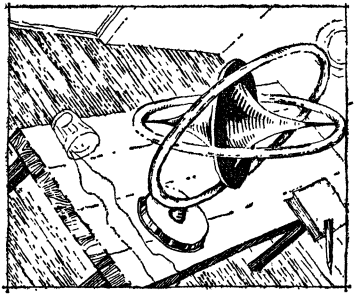


Рис. 5.15.

При помощи вращающихся волчков можно автоматически поддерживать заданный курс торпеды или самолета. Это делается при помощи механизмов, «следящих» за отклонением направления оси торпеды от направления оси волчка.

На применении вращающегося волчка основано устройство такого важного прибора, как гирокомпас. Можно доказать, что под действием силы Кориолиса и сил трения ось волчка в конце концов устанавливается параллельно земной оси и, значит, указывает на север.

Гирокомпасы широко применяются в морском флоте. Главная их часть — мотор с тяжелым маховиком, делающим до 25 000 об/мин.

Несмотря на ряд трудностей в устранении различных помех, в частности от качки корабля, гирокомпасы имеют преимущество перед магнитными компасами. Недостаток последних — искажение показаний из-за влияния железных предметов и электрических установок на корабле.

ГИБКИЙ ВАЛ

Валы современных паровых турбин — важные части этих грандиозных машин. Изготовление таких валов, достигающих 10 м в длину и 0,5 м в поперечнике,— сложная технологическая задача. Вал мощной турбины может нести нагрузку около 200 т и вращаться со скоростью 3000 об/мин.

На первый взгляд может показаться, что такой вал должен быть исключительно твердым и прочным. Это, однако, не так. При десятках тысяч оборотов в минуту жестко закрепленный и не способный изгибаться вал неминуемо ломается, какова бы ни была его прочность.

Нетрудно понять, почему непригодны жесткие валы. Как бы точно ни работали машиностроители, они не могут избежать хотя бы небольшой асимметрии колеса турбины. При вращении такого колеса возникают огромные центробежные силы — напомним, что их значения пропорциональны квадрату скорости вращения. Если они не уравновешены в точности, то вал начнет «биться» о подшипники (ведь неуравновешенные центробежные силы «вращаются» вместе с машиной), сломает их и разнесет турбину.

Это явление создавало в свое время непреодолимые затруднения в увеличении скорости вращения турбины. Выход из положения был найден на рубеже прошлого и нынешнего веков. В технику турбостроения были введены гибкие валы.

Для того чтобы понять, в чем заключалась идея этого замечательного изобретения, нам надо вычислить суммарное действие центробежных сил. Как же сложить эти силы? Оказывается, что равнодействующая всех центробежных сил приложена в центре тяжести вала и имеет такую же величину, как если бы вся масса колеса турбины была сосредоточена в центре тяжести.

Обозначим через a расстояние центра тяжести колеса турбины от оси, отличное от нуля из-за небольшой асимметрии колеса. При вращении на вал будут действовать центробежные силы, и вал изогнется. Обозначим смещение вала через l. Подсчитаем эту величину. Формула для центробежной силы нам известна (см. стр. 67) — эта сила пропорциональна расстоянию от центра тяжести до оси, которое теперь есть $a+l$, и равна $4\pi^2 n^2 M(a+l)$, где n — число оборотов в минуту, а M — масса вращающихся частей. Центробежная сила уравновешивается упругой силой, которая пропорциональна смещению вала и будет равна kl, где коэффициент k характеризует жесткость вала. Итак:

$$kl = 4\pi^2 n^2 M (a + l),$$

откуда

$$l = a \Big/ \left(\frac{k}{4\pi^2 n^2 M} - 1 \right).$$

Судя по этой формуле, гибкому валу не страшны большие обороты. При очень больших (пусть даже бесконечно больших) значениях n прогиб вала l не растет неограниченно. Значение $k/4\pi^2n^2M$, фигурирующее в последней формуле, обращается в нуль, а прогиб вала l становится равным величине асимметрии с обратным знаком.

Этот результат вычисления означает, что при больших оборотах асимметричное колесо, вместо того чтобы разорвать вал, изгибает его так, чтобы уничтожилось влияние асимметрии. Изгибающийся вал центрирует вращающиеся части, своим изгибом переносит центр тяжести на ось вращения и таким образом приводит к нулю действие центробежной силы.

Гибкость вала является не только не недостатком, но и, напротив, необходимым условием устойчивости. Ведь для устойчивости валу надо прогнуться на величину a и при этом не сломаться.

Внимательный читатель может заметить погрешность в проведенных рассуждениях. Если сместить «центрирующий» при больших оборотах вал из найденного нами положения равновесия и рассматривать только центробежную и упругую силы, то легко заметить, что это равновесие неустойчиво. Оказалось, однако, что кориолисовы силы спасают положение и делают это равновесие вполне устойчивым.

Турбина начинает медленно вращаться. Вначале, когда n очень мало, дробь $k/4\pi^2n^2M$ будет иметь большое значение. Пока эта дробь при увеличении числа оборотов будет больше единицы, прогиб вала будет иметь тот же знак, что и первоначальное смещение центра тяжести колеса. Таким образом, в эти начальные моменты движения прогибающийся вал не центрирует колесо, а, напротив, своим изгибом увеличивает общее смещение центра тяжести, а значит, и центробежную силу. По мере увеличения числа оборотов n (но при сохранении условия $k/4\pi^2n^2M>1$) смещение растет и, наконец, наступает критический момент. При $k/4\pi^2n^2M=1$ знаменатель формулы для смещения l обращается в нуль, значит, прогиб вала становится формально бесконечно большим. При такой скорости вращения вал сломается. При запуске турбины этот момент должен быть пройден очень быстро, надо проскочить критическое число оборотов и перейти к значительно более быстрому движению турбины, при котором начнется явление самоцентрирования, описанное выше.

Но что это за критический момент? Мы можем переписать его условие в следующем виде:

$$4\pi^2 M/k = 1/n^2.$$

Или, заменяя число оборотов на период вращения при помощи соотношения $n = 1/T$ и извлекая корень, в такой форме:

$$T = 2\pi\sqrt{M/k}.$$

Что же за величину получили мы в правой части равенства? Формула выглядит весьма знакомой. Обратившись к стр. 118, мы видим, что в правой части у нас фигурирует собственный период колебания колеса на валу. Период $2\pi\sqrt{M/k}$ — это период, с которым колебалось бы колесо турбины массы M на валу с жесткостью k, если бы мы оттянули колесо в сторону, чтобы оно колебалось само по себе.

Итак, опасный момент — это совпадение периода вращения колеса турбины с собственным периодом колебания системы турбина — вал. В существовании критического числа оборотов повинно явление резонанса.

Глава 6

ТЯГОТЕНИЕ

НА ЧЕМ ЗЕМЛЯ ДЕРЖИТСЯ?

В далекие времена на этот вопрос давали простой ответ: на трех китах. Правда, оставалось неясным, на чем держатся киты. Однако наших наивных прародителей это не смущало.

Правильные представления о характере движения Земли, о форме Земли, о многих закономерностях движения планет вокруг Солнца возникли задолго до того, как был дан ответ на вопрос о причинах движения планет.

И в самом деле, на чем «держатся» Земля и планеты? Почему они двигаются вокруг Солнца по определенным путям, а не улетают от него прочь?

Ответа на такие вопросы долгое время не было, и церковь, боровшаяся против коперниковой системы мира, использовала это для отрицания факта движения Земли.

Открытием истины мы обязаны великому английскому ученому Исааку Ньютону (1643—1727).

Известный исторический анекдот говорит, что, сидя в саду под яблоней, задумчиво наблюдая за тем, как от порывов ветра то одно, то другое яблоко падает на землю, Ньютон пришел к мысли о существовании сил тяготения между всеми телами Вселенной.

В результате открытия Ньютона выяснилось, что множество, казалось бы, разнородных явлений — падение свободных тел на землю, видимые движения Луны и Солнца, океанские приливы и т. д.— представляют собой проявления одного и того же закона природы: закона всемирного тяготения.

Между всеми телами Вселенной, говорит этот закон, будь то песчинки, горошинки, камни или планеты, действуют силы взаимного притяжения.

На первый взгляд закон кажется неверным: мы что-то не замечали, чтобы притягивались друг к другу окружающие нас предметы. Земля притягивает к себе любые тела, в этом никто не усомнится. Но, может быть, это особое свойство Земли? Нет, это не так. Притяжение двух любых предметов невелико и лишь поэтому не бросается в глаза. Тем не менее специальными опытами его можно обнаружить. Но об этом позже.

Наличие всемирного тяготения, и только оно, объясняет устойчивость Солнечной системы, движение планет и других небесных тел.

Луна держится на орбите силами земного притяжения, Земля на своей траектории — силами притяжения Солнца.

Круговое движение небесных тел происходит так же, как круговое движение камня, закрученного на веревке. Силы всемирного тяготения — это невидимые «канаты», заставляющие небесные тела двигаться по определенным путям.

Утверждение о существовании сил всемирного тяготения еще мало что означало. Ньютон нашел закон тяготения, показал, от чего зависят эти силы.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Первый вопрос, который задал себе Ньютон, был таков: чем отличается ускорение Луны от ускорения яблока? Иначе говоря, каково различие между ускорением g, которое земной шар создает на своей поверхности, т. е. на расстоянии r от центра, и ускорением, создаваемым Землей на расстоянии R, на котором находится Луна от Земли?

Чтобы подсчитать это ускорение v^2/R, надо знать скорость движения Луны и ее расстояние от Земли. Оба эти числа были Ньютону известны. Ускорение Луны оказалось равным примерно 0,27 см/с². Это приблизительно в 3600 раз меньше значения $g=980$ см/с².

Значит, создаваемое Землей ускорение уменьшается с удалением от центра Земли. Но как быстро? Расстояние от Земли до Луны равно шестидесяти земным радиусам. Но 3600 есть квадрат 60. Увеличив расстояние в 60 раз, мы уменьшили ускорение в $(60)^2$ раз.

Ньютон сделал вывод, что ускорение, а значит и сила тяготения, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Далее, мы уже знаем, что сила, действующая на тело в поле тяжести, пропорциональна его массе. Поэтому первое тело притягивает второе с силой, пропорциональной массе второго тела; второе тело притягивает первое с силой, пропорциональной массе первого тела.

Речь идет о тождественно равных силах — силах действия и противодействия. Значит, сила взаимного тяготения должна быть пропорциональна массе как первого, так и второго тела, иначе говоря — произведению масс.

Итак,

$$F = \gamma \frac{Mm}{r^2}.$$

Это и есть закон всемирного тяготения. Ньютон предположил, что такой закон будет верен для любой пары тел.

Теперь эта смелая гипотеза полностью доказана. Таким образом, сила притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

А что это за γ, которая вошла в формулу? Это коэффициент пропорциональности. Нельзя ли считать его равным единице, как мы это уже неоднократно делали? Нет, нельзя: мы условились измерять массу в граммах, расстояние в сантиметрах, а силу в динах. Значение γ равно силе притяжения между двумя массами в 1 г, находящимися на расстоянии 1 см. Мы не можем считать силу равной чему-то, в том числе и одной дине: коэффициент γ должен быть измерен.

Чтобы найти γ, разумеется, не обязательно промерять силы притяжения граммовых гирек. Мы заинтересованы в том, чтобы произвести измерение над массивными телами — тогда сила будет побольше.

Если определить массу двух тел, знать расстояние между ними и измерить силу притяжения, то γ найдется простым расчетом.

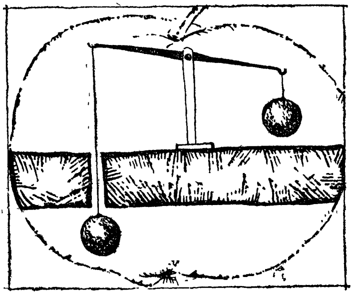


Рис. 6.1.

Такие опыты ставились много раз. Они показали, что значение γ всегда одно и то же, независимо от материала притягивающихся тел, а также от свойств среды, в которой они находятся. Коэффициент γ называется гравитационной постоянной. Она равна

$$\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-8}\ \text{см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2.$$

Схема одного из опытов по измерению γ показана на рис. 6.1. К концам коромысла весов подвешены два шарика одинаковой массы. Один из них находится над свинцовой плитой, другой — под ней. Свинец (для опыта взято 100 т свинца) увеличивает своим притяжением вес правого шарика и уменьшает вес левого. Правый шарик перевешивает левый. По величине отклонения коромысла весов вычисляется значение γ.

Незначительной величиной γ объясняется трудность обнаружения силы тяготения между двумя предметами.

Два тяжелых 1000-килограммовых груза тянутся друг к другу с ничтожной силой, равной всего лишь 6,7 дин, т. е. 0,007 гс, если эти предметы находятся на расстоянии 1 м один от другого.

Но как велики силы притяжения между небесными телами! Между Луной и Землей

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8}\,\frac{6 \cdot 10^{27} \cdot 0{,}74 \cdot 10^{26}}{(38 \cdot 10^{9})^2} = 2 \cdot 10^{25}\ \text{дин} \approx 2 \cdot 10^{19}\ \text{кгс},$$

между Землей и Солнцем

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8}\,\frac{2 \cdot 10^{33} \cdot 6 \cdot 10^{27}}{(15 \cdot 10^{12})^2} = 3{,}6 \cdot 10^{27}\ \text{дин} \approx 3{,}6 \cdot 10^{21}\ \text{кгс}.$$

ВЗВЕШИВАНИЕ ЗЕМЛИ

Прежде чем начать пользоваться законом всемирного тяготения, нам надо обратить внимание на одну важную деталь.

Мы только что высчитывали силу притяжения между двумя грузами, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга. А если бы эти тела находились на расстоянии 1 см? Что же подставлять в формулу — расстояние между поверхностями тел или расстояние между центрами тяжести или что-нибудь третье?

Закон всемирного тяготения $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ можно со всей строгостью применять тогда, когда подобных сомнений не возникает. Расстояние между телами должно быть много больше размеров тел; мы должны иметь право рассматривать тела как точки. Как же применить закон к двум близким телам? В принципе просто: надо мысленно разбить тела на маленькие кусочки, для каждой пары подсчитать силу F, а затем сложить (векторно) все силы.

В принципе это просто, но практически довольно сложно.

Однако природа помогла нам. Расчет показывает: если частицы тела взаимодействуют с силой, пропорциональной $1/r^2$, то шарообразные тела обладают свойством притягиваться как точки, расположенные в центрах шаров. Для двух близких шаров формула $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ точно справедлива, как и для далеких, если r — расстояние между центрами шаров. Мы уже использовали это правило раньше, вычисляя ускорение на поверхности Земли.

Теперь мы имеем право применять формулу тяготения для вычисления силы притяжения тела Землей. Под r мы должны понимать расстояние от центра Земли до тела.

Пусть M — масса и R — радиус Земли. Тогда сила притяжения тела массы m у земной поверхности

$$F = \gamma \frac{M}{R^2} \cdot m.$$

Но ведь это же вес тела, который мы всегда выражаем как mg. Значит, ускорение свободного падения

$$g = \gamma \frac{M}{R^2}.$$

Теперь-то мы можем сказать, как взвесили Землю. Массу Земли можно вычислить из этой формулы, так как g, γ и R — известные величины. Таким же способом можно взвесить и Солнце.

Но разве можно назвать такое вычисление взвешиванием? Конечно, можно; косвенные измерения играют в физике не меньшую роль, чем прямые.

Решим теперь любопытную задачу.

Для организации всемирного телевидения существенную роль играет создание «висящего» спутника, т. е. такого, который все время находился бы в одной и той же точке плоскости экватора над земной поверхностью. Будет ли такой спутник испытывать трение? Это зависит от того, насколько далеко от Земли ему придется совершать свое вращение.

«Висящий» спутник должен вращаться с периодом T, равным 24 часам. Если r есть расстояние спутника от центра Земли, то его скорость $v=2\pi r/T$ и его ускорение $v^2/r=(4\pi^2/T^2)r$. С другой стороны, это ускорение, источником которого является земное притяжение, равно $\gamma M/r^2=gR^2/r^2$. Приравнивая величины ускорений, получим:

$$g\frac{R^2}{r^2}=\frac{4\pi^2 r}{T^2}, \quad \text{т. е.} \quad r^3=\frac{gR^2T^2}{4\pi^2}.$$

Подставляя округленные значения $g=10$ м/с², $R=6\cdot10^6$ м и $T=9\cdot10^4$ с, получим: $r^3=7\cdot10^{22}$ м³, т. е. $r\approx4\cdot10^7$ м$=40\,000$ км. На такой высоте атмосферного трения нет, и «висящий» спутник, который удается создать, не будет замедлять своего «неподвижного бега».

ИЗМЕРЕНИЯ g НА СЛУЖБЕ РАЗВЕДКИ

Речь идет не о военной разведке. Там знание ускорения свободного падения ни к чему. Речь идет о геологической разведке, цель которой — найти залежи полезных ископаемых под землей, не роя ям, не копая шахт.

Существует несколько методов очень точного определения ускорения свободного падения. Можно найти g просто взвешиванием стандартного груза на пружинных весах. Геологические весы должны быть предельно чувствительны — их пружина изменяет растяжение

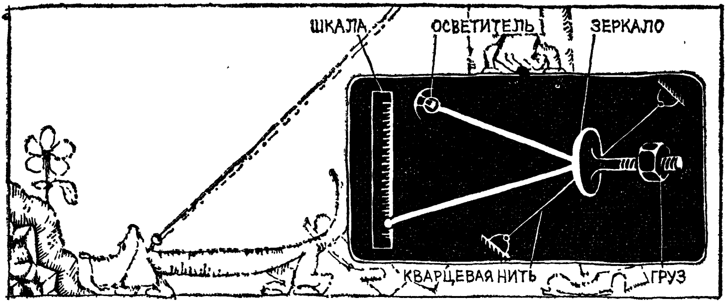


Рис. 6.2.

при добавлении нагрузки меньше чем в миллионную долю грамма. Превосходные результаты дают крутильные кварцевые весы. Устройство их в принципе несложно. К горизонтально натянутой кварцевой нити приварен рычаг, весом которого нить слегка закручивается (рис. 6.2).

Для тех же целей применяется и маятник. Еще недавно маятниковые способы измерения g были единственными, и лишь в последние 10—20 лет их стали вытеснять более удобные и точные весовые методы. Во всяком случае, измеряя период колебания маятника, по формуле $T=2\pi\sqrt{l/g}$ можно найти значение g достаточно точно.

Измеряя на одном приборе значение g в разных местах, можно судить об относительных изменениях свободного падения с точностью до миллионных долей.

Измеряя значение g в каком-либо месте земной поверхности, испытатель устанавливает: здесь значение аномально, оно меньше нормы на столько-то или выше нормы на такую-то величину.

Но что является нормой для значения g?

Значение ускорения свободного падения на земной поверхности имеет два закономерных изменения, которые давно уже прослежены и хорошо известны исследователям.

Прежде всего g закономерно уменьшается при переходе от полюса к экватору. Об этом говорилось выше. Напомним лишь, что такое изменение происходит по двум причинам: во-первых, Земля — не шар, и тело, находясь у полюса, будет ближе к центру Земли; во-вторых, по мере продвижения к экватору сила тяжести будет все больше ослабляться центробежной силой.

Второе закономерное изменение g — это уменьшение с высотой. Чем дальше от центра Земли, тем меньше g, в соответствии с формулой $g = \gamma \frac{M}{(R+h)^2}$, где R — радиус Земли, h — высота над уровнем моря.

Таким образом, на одной и той же широте и на одной и той же высоте над уровнем моря ускорение свободного падения должно быть одинаковым.

Точные измерения показывают, что весьма часто встречаются отклонения от этой нормы — аномалии тяготения. Причина аномалий состоит в неоднородности распределения массы вблизи места измерения.

Как мы поясняли, сила тяготения со стороны большого тела может быть мысленно представлена как сумма сил, действующих со стороны отдельных частиц большого тела. Притяжение маятника Землей есть результат действия на него всех частичек Земли. Но ясно, что близкие частицы вносят наибольший вклад в суммарную силу — ведь притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния.

Если вблизи места измерения сосредоточены тяжелые массы, g будет больше нормы, в обратном случае g меньше нормы.

Если, например, измерить g на горе или на самолете, летящем над морем на высоте горы, то в первом случае получится бо́льшая цифра. Например, на горе Этне в Италии значение g на 0,292 см/с^2 выше нормы. Также выше нормы значение g на уединенных океанских островах. Ясно, что в обоих случаях возрастание g объясняется сосредоточением дополнительных масс в месте измерения.

Не только значение g, но и направление силы тяжести могут отклоняться от нормы. Если подвесить груз на нитке, то вытянутая нить покажет вертикаль для этого места. Эта вертикаль может отклониться от нормы. «Нормальная» вертикаль определяется по звездам, так как для любой географической точки вычислено, в какое место неба в данный момент суток и года «упирается» вертикаль «идеальной» фигуры Земли.

Представьте себе, что вы производите опыты с отвесом у подножия большой горы. Грузик отвеса притягивается Землей к ее центру и горой — в сторону. Отвес должен отклониться при таких условиях от направления нормальной вертикали (рис. 6.3). Так как масса Земли много больше массы горы, то такие отклонения не превышают нескольких угловых секунд.

Рис. 6.3.

Отклонения отвеса приводят иногда к странным результатам. Например, во Флоренции влияние Аппенин приводит не к притяжению, а к отталкиванию отвеса. Объяснение может быть одно: в горах есть огромные пустоты.

Замечательный результат дают измерения ускорения свободного падения в масштабе материков и океанов. Материки значительно тяжелее океанов, поэтому, казалось бы, значения g над материками должны быть больше, чем над океанами. В действительности же значения g, промеренные вдоль одной широты над океанами и материками, в среднем одинаковы.

Объяснение опять-таки лишь одно: материки покоятся на более легких породах, а океаны — на более тяжелых. И действительно, там, где возможны непосредственные изыскания, геологи устанавливают, что океаны покоятся на тяжелых базальтовых породах, а материки — на легких гранитах.

Но сразу же возникает следующий вопрос: почему тяжелые и легкие породы так точно компенсируют различие весов материков и океанов? Такая компенсация не может быть делом случая, причины ее должны корениться в устройстве оболочки Земли.

Геологи полагают, что верхние части земной коры как бы плавают на подстилающей пластичной (т. е. легко деформируемой, как мокрая глина) массе. Давление на глубинах около 100 км должно быть всюду одинаковым, так же как одинаково давление на дне сосуда с водой, в котором плавают куски дерева разного веса. Поэтому столб вещества площадью 1 м², от поверхности до глубины 100 км, должен иметь и под океаном, и под материком одинаковый вес.

Это выравнивание давлений (его называют изостазией) и приводит к тому, что над океаном и материками вдоль одной широтной линии значения ускорения свободного падения g не отличаются существенно.

Местные аномалии силы тяжести служат нам так, как маленькому Муку из сказки Гауфа служила его волшебная палочка, которая стучала о землю там, где находилось золото или серебро.

Тяжелую руду нужно искать в тех местах, где g наибольшее. Напротив, залежи легкой соли обнаруживают по местным занижениям значения g. Измерить g можно с точностью до стотысячных долей от 1 см/с².

Методы разведки при помощи маятников и сверхточных весов называют гравитационными. Они имеют большое практическое значение, в частности для поисков нефти. Дело в том, что при гравитационных методах разведки легко обнаружить подземные соляные купола, а очень часто оказывается, что где соль, там и нефть. Причем нефть лежит в глубине, а соль ближе к земной поверхности. Методом гравитационной разведки была открыта нефть в Казахстане и в других местах.

ТЯЖЕСТЬ ПОД ЗЕМЛЕЙ

Нам осталось осветить еще один интересный вопрос. Как будет меняться сила тяжести, если углубляться под землю?

Вес предмета — это результат натяжения незримых нитей, протянутых к этому предмету от каждого кусочка вещества Земли. Вес — это суммарная сила, результат сложения элементарных сил, действующих на предмет со стороны частиц Земли. Все эти силы, хотя и направлены под разными углами, тянут тело «вниз» — к центру Земли.

А какова будет тяжесть предмета, находящегося в подземной лаборатории? На него будут действовать силы притяжения и с внутренних, и с внешних слоев Земли.

Рассмотрим силы тяготения, действующие в точке, лежащей внутри земного шара, со стороны внешнего слоя. Если разбить этот слой на тонкие слои, вырезать в одном из них маленький квадратик со стороной a_1 и протянуть линии от вершин квадрата через точку O, тяжесть в которой нас интересует, то на противоположной стороне слоя получится квадратик другого размера со стороной a_2 (рис. 6.4). Силы притяжения, действующие в точке O со стороны двух квадратиков, направлены противоположно и пропорциональны по закону тяготения m_1/r_1^2 и m_2/r_2^2. Но массы квадратов m_1 и m_2 пропорциональны площадям квадратов. Поэтому силы тяготения пропорциональны выражениям a_1^2/r_1^2 и a_2^2/r_2^2.

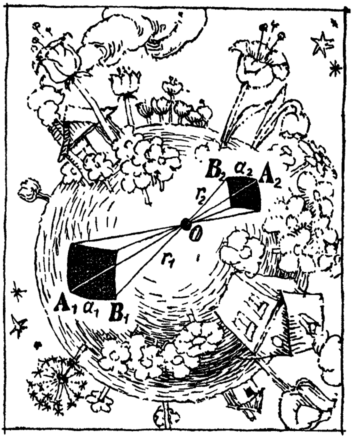


Рис. 6.4.

Предоставляем читателю доказать, что эти отношения будут равными, т. е. силы притяжения, действующие в точке O со стороны двух квадратиков, уравновешиваются.

Разбив тонкий слой на подобные пары «противоположных» квадратов, мы установили замечательный факт: тонкий однородный шаровой слой не действует на точку, расположенную внутри него. Но это верно для всех тонких слоев, на которые мы разбили шаровой пояс, лежащий над интересовавшей нас подземной точкой.

Значит, земной слой, находящийся над телом, все равно что отсутствует. Действие отдельных его частей на тело уравновешивается, и суммарная сила притяжения со стороны внешнего слоя равняется нулю.

Конечно, во всех этих рассуждениях мы считали плотность Земли постоянной внутри каждого слоя.

Результат наших рассуждений позволяет легко получить формулу для силы тяжести, действующей на любой глубине H под землей. Точка, расположенная на глубине H, испытывает лишь притяжение со стороны внутренних слоев Земли. Формула для ускорения силы тяжести $g=\gamma M/r^2$ применима и для этого случая, но M и r — это масса и радиус не всей Земли, а ее «внутренней» по отношению к этой точке части.

Если бы Земля имела одинаковую плотность во всех слоях, то формула для g приняла бы вид:

$$g=\gamma\frac{\rho\frac{4}{3}\pi(R-H)^3}{(R-H)^2}=\frac{4}{3}\pi\gamma\rho(R-H),$$

где ρ — плотность, R — радиус Земли.

Это значит, что g менялось бы прямо пропорционально $(R-H)$: чем больше глубина H, тем меньше было бы g.

На самом же деле поведение g вблизи земной поверхности — мы можем проследить за ним вплоть до глубин 5 км (ниже уровня моря) — совсем не подчиняется этому закону. Опыт показывает, что в этих слоях g, наоборот, растет с глубиной. Расхождение опыта с формулой объясняется тем, что не было учтено различие плотности на разных глубинах.

Средняя плотность Земли легко находится делением массы на объем земного шара. Это приводит нас к цифре 5,52. В то же время плотность поверхностных пород много меньше — она численно равна 2,75. Плотность земных слоев растет с глубиной. В поверхностных слоях Земли этот эффект берет верх над идеальным уменьшением, которое следует из выведенной формулы, и величина g возрастает.

ЭНЕРГИЯ ТЯГОТЕНИЯ

На простом примере мы уже познакомились с энергией тяготения. Тело, поднятое на высоту h над Землей, обладает потенциальной энергией mgh.

Однако этой формулой можно пользоваться лишь тогда, когда высота h много меньше радиуса Земли.

Энергия тяготения — важная величина, и интересно получить формулу ее, которая годилась бы для тела, поднятого на любую высоту над Землей, а также вообще для двух масс, притягивающихся по универсальному закону:

$$F=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}.$$

Положим, что под действием взаимного притяжения тела немного сблизились. Между ними было расстояние r_1, а стало r_2. При этом совершается работа $A=F(r_1-r_2)$. Значение силы надо взять в какой-то средней точке. Итак,

$$A=\gamma\frac{m_1m_2}{r_{ср}^2}(r_1-r_2).$$

Если r_1 и r_2 мало отличаются друг от друга, то можно заменить $r_{ср}^2$ произведением r_1r_2. Получаем:

$$A=\gamma\frac{m_1m_2}{r_2}-\gamma\frac{m_1m_2}{r_1}.$$

Эта работа произведена за счет энергии тяготения:

$$A=U_1-U_2,$$

где U_1 — начальное, а U_2 — конечное значение потенциальной энергии тяготения.

Сопоставляя эти две формулы, находим для потенциальной энергии выражение

$$U=-\gamma\frac{m_1m_2}{r}.$$

Оно похоже на формулу силы тяготения, но в знаменателе стоит r в первой степени.

По этой формуле при очень больших r потенциальная энергия $U=0$. Это разумно, так как на таких расстояниях притяжение уже не будет чувствоваться. Но при сближении тел потенциальная энергия должна уменьшаться. Ведь за ее счет происходит работа.

А куда же уменьшаться от нуля? В отрицательную сторону. Поэтому в формуле и стоит минус. Ведь —5 меньше нуля, а —10 меньше —5.

Если речь идет о движении около земной поверхности, то общее выражение силы тяготения можно заменить произведением mg. Тогда с большой точностью $U_1-U_2=mgh$.

Но на поверхности Земли тело имеет потенциальную энергию $-\gamma\frac{Mm}{R}$, где R — радиус Земли. Значит, на высоте h над земной поверхностью

$$U=-\gamma\frac{Mm}{R}+mgh.$$

Когда мы впервые ввели формулу потенциальной энергии $U=mgh$, было условлено высоту и энергию отсчитывать от земной поверхности. Пользуясь формулой $U=mgh$, мы отбрасываем постоянный член $-\gamma\frac{Mm}{R}$, условно считаем его равным нулю. Так как нас интересуют лишь разности энергий — ведь обычно измеряется работа, которая есть разность энергий,— то присутствие постоянного члена $-\gamma\frac{Mm}{R}$ в формуле потенциальной энергии роли не играет.

Энергия тяготения определяет прочность цепей, «привязывающих» тело к Земле. Как порвать эти цепи, как добиться того, чтобы брошенное с Земли тело не вернулось на Землю? Ясно, что для этого нужно придать телу большую начальную скорость. Но каково же минимальное требование?

По мере отдаления от Земли потенциальная энергия выброшенного с Земли тела (снаряда, ракеты) будет расти (абсолютное значение U падает); кинетическая энергия будет падать. Если кинетическая энергия тела станет равной нулю преждевременно, до того как мы оборвем цепи тяготения земного шара, выброшенный снаряд упадет обратно на Землю.

Необходимо, чтобы тело сохраняло кинетическую энергию до тех пор, пока его потенциальная энергия практически не упадет до нуля. Перед отправлением снаряд обладал потенциальной энергией $-\gamma\frac{Mm}{R}$ (M и R — масса и радиус Земли). Поэтому снаряду нужно дать такую скорость, которая сделала бы полную энергию оторвавшегося снаряда положительной. Тело с отрицательной полной энергией (абсолютное значение потенциальной энергии больше значения кинетической) не выберется за пределы сферы тяготения.

Таким образом, мы приходим к простому условию. Для того чтобы тело массы m оторвать от Земли, надо, как уже сказано, преодолеть потенциальную энергию тяготения

$$\gamma \frac{Mm}{R}.$$

Скорость снаряда должна быть при этом доведена до значения так называемой второй космической скорости v_2, которую легко вычислить из равенства кинетической и потенциальной энергий:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \gamma \frac{mM}{R}, \quad \text{т. е.} \quad v_2^2 = 2\gamma \frac{M}{R},$$

или, так как $g = \gamma \frac{M}{R^2}$,

$$v_2^2 = 2gR.$$

Значение v_2, вычисляемое по этой формуле, составляет 11 км/с — конечно, без учета сопротивления атмосферы. Эта скорость в $\sqrt{2} = 1{,}41$ раза больше первой космической скорости $v_1 = \sqrt{gR}$ искусственного спутника, вращающегося около земной поверхности, т. е $v_2 = \sqrt{2}\, v_1$.

Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли; радиус ее меньше земного в четыре раза. Поэтому энергия тяготения на Луне в двадцать раз меньше, чем на Земле, и для отрыва от Луны достаточно скорости 2,5 км/с.

Кинетическая энергия $mv_2^2/2$ тратится на то, чтобы порвать цепи тяготения к планете — отправной станции. Если же мы хотим, чтобы, преодолев тяготение, ракета двигалась со скоростью v, то на это нужна дополнительная энергия $mv^2/2$. В этом случае, посылая ракету в путешествие, необходимо сообщить ей энергию $\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$. Таким образом, три скорости, о которых идет речь, связаны простым соотношением:

$$v_0^2 = v_2^2 + v^2.$$

Чему же должна равняться скорость v_3, нужная для преодоления тяготения Земли и Солнца,— минимальная скорость снаряда, посылаемого к далеким звездам? Эту скорость мы обозначили v_3, потому что ее называют третьей космической скоростью.

Определим прежде всего значение скорости, необходимой для преодоления одного лишь притяжения Солнца.

Как мы только что показали, скорость, нужная для выхода из сферы земного притяжения снаряда, отправляемого в путешествие, в $\sqrt{2}$ раз больше, чем скорость вывода на орбиту земного спутника. Эти рассуждения в равной степени относятся и к Солнцу, т. е. скорость, нужная для ухода от Солнца, в $\sqrt{2}$ раз больше, чем скорость спутника Солнца (т. е. Земли). Поскольку скорость движения Земли вокруг Солнца составляет примерно 30 км/с, то скорость, необходимая для ухода из сферы притяжения Солнца, равна 42 км/с. Это очень много, однако для отправления снаряда к далеким звездам надо, разумеется, использовать движение земного шара и запускать тело в ту сторону, куда движется Земля. Тогда нам нужно добавить всего 42—30=12 км/с.

Теперь мы можем окончательно вычислить третью космическую скорость. Это скорость, с которой надо вывести ракету, чтобы, выйдя из сферы земного притяжения, она имела скорость 12 км/с. Воспользовавшись формулой, приведенной только что, получим:

$$v_3^2 = (11)^2 + (12)^2,$$

откуда $v_3 = 16$ км/с.

Итак, имея скорость около 11 км/с тело покинет Землю, но «далеко» такой снаряд не уйдет; Земля его отпустила, но Солнце не даст ему свободы. Он превратится в спутника Солнца.

Оказывается, что скорость, необходимая для межзвездного путешествия, всего лишь в полтора раза больше скорости, нужной для путешествия по Солнечной системе внутри земной орбиты. Правда как уже говорилось, всякое заметное увеличение начальной скорости снаряда сопряжено с немалыми техническими трудностями (см. стр. 87).

КАК ДВИЖУТСЯ ПЛАНЕТЫ

На вопрос, как движутся планеты, можно ответить кратко: повинуясь закону тяготения. Ведь силы тяготения — единственные силы, приложенные к планетам.

Так как масса планет много меньше массы Солнца, то силы взаимодействия между планетами не играют большой роли. Каждая из планет движется почти так, как это диктует ей сила притяжения одного лишь Солнца, словно других планет и не существует.

Законы движения планеты вокруг Солнца следуют из закона всемирного тяготения.

Впрочем, исторически дело было не так. Законы движения планет были найдены замечательным немецким астрономом Иоганном Кеплером до Ньютона без помощи закона тяготения на основании почти двадцатилетней обработки астрономических наблюдений.

Пути, или, как говорят астрономы, орбиты, которые описывают планеты около Солнца, очень близки к окружностям.

Как связан период обращения планеты с радиусом ее орбиты?

Сила тяготения, действующая на планету со стороны Солнца, равна

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

где M — масса Солнца, m — масса планеты, r — расстояние между ними.

Но F/m есть, согласно основному закону механики, не что иное, как ускорение, и притом центростремительное:

$$F/m = v^2/r.$$

Скорость планеты можно представить как длину окружности $2\pi r$, поделенную на период обращения T. Подставив $v=2\pi r/T$ и значение силы F в формулу ускорения, получим:

$$\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{\gamma M}{r^2}, \quad \text{т. е.} \quad T^2 = \frac{4\pi^2}{\gamma M} r^3.$$

Коэффициент пропорциональности перед r^3 есть величина, зависящая только от массы Солнца,— одинаковая для любой планеты. Следовательно, для двух планет справедливо соотношение

$$T_1^2/T_2^2 = r_1^3/r_2^3.$$

Отношение квадратов времен обращения планет оказывается равным отношению кубов радиусов их орбит. Этот интересный закон был выведен Кеплером из опыта. Закон всемирного тяготения объяснил наблюдения Кеплера.

Круговое движение одного небесного тела около другого — это лишь одна из возможностей.

Траектории одного тела, вращающегося около другого благодаря силам тяготения, могут быть самыми различными. Однако, как показывает расчет и как еще до всякого расчета было обнаружено Кеплером, все они принадлежат к одному классу кривых, называемых эллипсами.

Если привязать нитку к двум булавкам, воткнутым в лист чертежной бумаги, натянуть нитку острием карандаша и двигать карандашом так, чтобы нитка оставалась натянутой, то на бумаге в конце концов прочертится замкнутая кривая — это и есть эллипс (рис. 6.5). Места, где находятся булавки, будут фокусами эллипса.

Эллипсы могут иметь различную форму. Если взять нитку много длиннее, чем расстояние между булавками, то эллипс будет очень похож на круг. Напротив, если длина нитки чуть-чуть больше расстояния между булавками, то получится удлиненный эллипс — почти палочка.

Планеты описывают эллипсы, в одном из фокусов которых находится Солнце.

Какие же эллипсы описывают планеты? Оказывается, очень близкие к окружности.

Наиболее отличен от окружности путь ближайшей к Солнцу планеты — Меркурия. Но и в этом случае самый длинный диаметр эллипса всего лишь на 2%

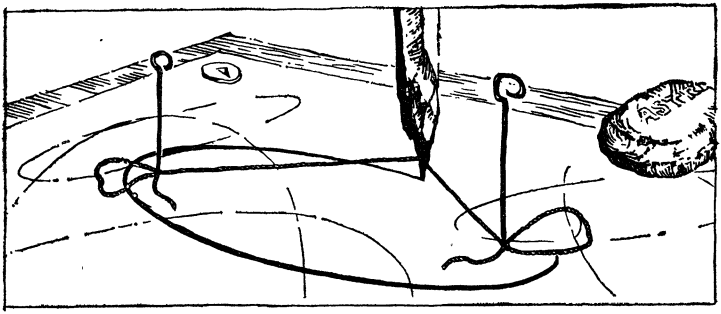


Рис. 6.5.

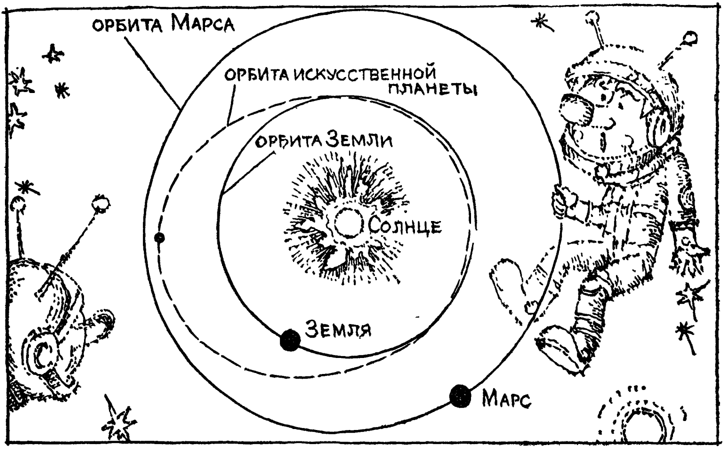


Рис. 6.6.

больше самого короткого. Иное дело орбиты искусственных планет. Посмотрите на рис. 6.6. Орбиту Марса не отличишь от круга.

Однако Солнце находится в одном из фокусов эллипса, а не в его центре, и поэтому расстояние планеты от Солнца меняется сильнее. Проведем линию через два фокуса эллипса — она пересечет эллипс в двух местах. Точку, ближайшую к Солнцу, называют перигелием, наиболее далекую от Солнца — афелием. Меркурий, когда находится в перигелии, в 1,5 раза ближе к Солнцу, чем в афелии.

Главные планеты описывают вокруг Солнца эллипсы, близкие к окружности. Однако существуют небесные тела, которые движутся около Солнца по сильно вытянутым эллипсам. К ним принадлежат кометы. Их орбиты не идут ни в какое сравнение по вытянутости с орбитами планет. Про небесные тела, движущиеся по эллипсам, можно сказать, что они принадлежат к семье Солнца. Однако в нашу систему забредают и случайные пришельцы.

Наблюдались кометы, описывающие около Солнца такие кривые, судя по форме которых можно было сделать вывод: комета не вернется, она не принадлежит к семейству Солнечной системы. «Открытые» кривые, описываемые кометами, называются гиперболами.

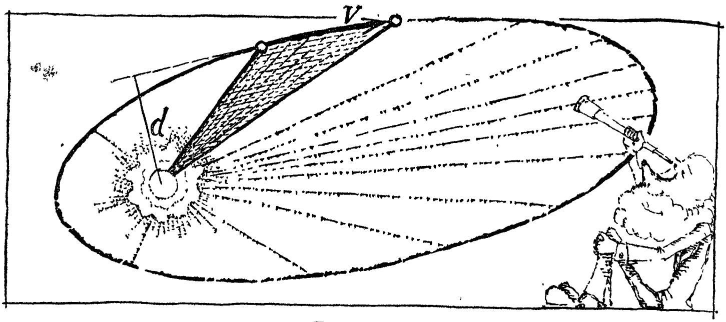


Рис. 6.7.

Особенно быстро движутся такие кометы, когда они проходят около Солнца. Это и понятно — полная энергия кометы постоянна, а подходя к Солнцу, комета имеет наименьшую потенциальную энергию. Значит, кинетическая энергия движения будет в этом случае наибольшая. Конечно, такой эффект имеет место для всех планет и для нашей Земли. Однако эффект этот невелик, так как мала разница потенциальных энергий в афелии и перигелии.

Интересный закон движения планеты вытекает из закона сохранения момента импульса.

На рис. 6.7 изображено два положения планеты. От Солнца, т. е. от фокуса эллипса, проведены два радиуса к положениям планеты, и образовавшийся сектор заштрихован. Надо определить величину площади, описываемой радиусом за единицу времени. При небольшом угле сектор, описанный радиусом за секунду, можно заменить треугольником. Основание треугольника — скорость v (путь, проходимый за секунду), а высота треугольника равна плечу d скорости. Поэтому площадь треугольника есть $vd/2$.

Из закона сохранения момента импульса следует постоянство величины mvd во время движения. Но если mvd неизменно, то не меняется и площадь треугольника $vd/2$. Мы можем начертить секторы для любых моментов времени — они окажутся одинаковыми по площади. Скорость планеты меняется, но то, что можно назвать секториальной скоростью, остается неизменным.

Не все звезды имеют планетное окружение. Довольно много в небе двойных звезд. Два огромных небесных тела вращаются одно около другого.

Огромная масса Солнца делает его центром семейства. В двойных звездах оба небесных тела имеют близкие по величине массы. В этом случае нельзя считать, что одна из двух звезд покоится. Как же происходит движение в этом случае? Мы знаем, что каждая замкнутая система имеет одну покоящуюся (или равномерно движущуюся) точку — это центр инерции. Вокруг этой точки и вращаются обе звезды. При этом они описывают подобные эллипсы, что следует из написанного на стр. 143 условия $m_1/m_2 = r_2/r_1$. Эллипс одной звезды больше эллипса другой во столько раз, во сколько раз ее масса меньше массы другой (рис. 6.8). При равных массах обе звезды будут описывать около центра инерции одинаковые траектории.

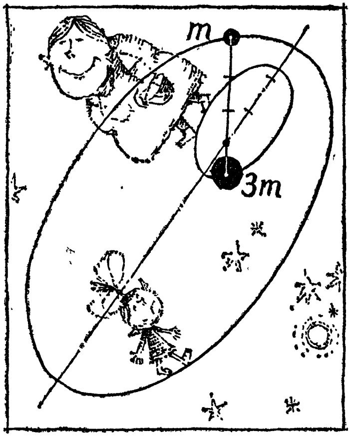


Рис. 6.8.

Планеты Солнечной системы находятся в идеальных условиях: они не подвержены трению.

Создаваемые людьми маленькие искусственные небесные тела — спутники — не находятся в таком идеальном положении: силы трения, пусть сначала очень незначительные, но все же чувствительные, решительно вмешиваются в их движение.

Полная энергия планеты остается неизменной. Полная энергия спутника с каждым оборотом слегка падает. На первый взгляд кажется, что трение будет замедлять движение спутника. В действительности происходит обратное.

Вспомним прежде всего, что скорость спутника равна $\sqrt{gR}$ или $\sqrt{\gamma M/R}$, где R — расстояние от центра Земли, а M — ее масса.

Полная энергия спутника равна:

$$E = -\gamma \frac{Mm}{R} + \frac{mv^2}{2}.$$

Подставив значение скорости спутника, найдем для кинетической энергии выражение $\gamma \frac{mM}{2R}$. Мы видим, что по абсолютной величине кинетическая энергия в два раза меньше потенциальной, а полная энергия равна

$$E = -\frac{\gamma}{2} \cdot \frac{mM}{R}.$$

При наличии трения полная энергия будет падать, т. е. (поскольку она отрицательна) расти по абсолютной величине; расстояние R начнет уменьшаться: спутник снижается. Что при этом произойдет со слагаемыми энергии? Потенциальная энергия убывает (растет по абсолютной величине), кинетическая энергия растет. Общий баланс все же отрицателен, так как потенциальная энергия убывает вдвое быстрее, чем возрастает кинетическая.

Трение приводит к возрастанию скорости движения спутника, а не к замедлению.

Теперь понятно, почему большая ракета-носитель обгоняет маленький спутник. У большой, но пустой ракеты трение больше.

МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПУТЕШЕСТВИЯ

К сегодняшнему дню мы уже были свидетелями многих путешествий на Луну. Автоматические ракеты и ракеты с людьми побывали на Луне и возвратились оттуда обратно.

Ракеты без людей побывали уже на Марсе. Не за горами посещение других планет, их исследование и возвращение на Землю людей или автоматических устройств.

Главные закономерности межпланетных путешествий, а именно принцип действия ракеты и расчет космических скоростей, нужные для того, чтобы создать спутник небесного тела или покинуть планету «насовсем», мы уже выяснили.

В качестве примера межпланетного путешествия мы рассмотрим полет на Луну. Для попадания на Луну нужно нацелить ракету на точку лунной орбиты. В эту

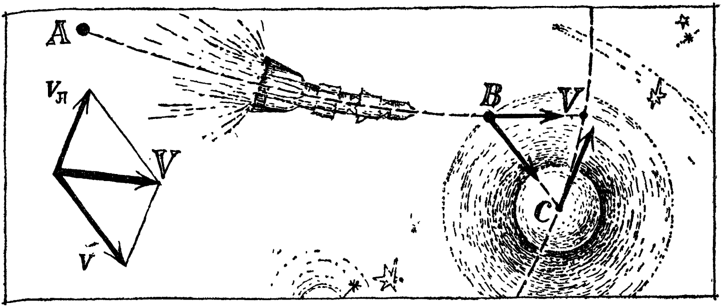


Рис. 6.9.

точку Луна должна подойти одновременно с ракетой. Можно отправить ракету по прямолинейной траектории, можно и под любым углом. Разумеется, не противопоказан и горизонтальный полет. Для того чтобы снаряд достиг Луны, ему должна быть придана вторая космическая скорость.

Различные траектории полета требуют разного количества топлива, так как отличаются потерями на разгон. Время полета очень резко зависит от начальной скорости. Если скорость минимальна, то время полета будет около пяти суток. Если скорость увеличить на 0,5 км/с, то это время уменьшится до одних суток.

На первый взгляд может показаться, что для прилунения достаточно попасть в сферу притяжения Луны с нулевой конечной скоростью. Представляется, что после этого аппарат просто «упадет» на Луну. Ошибка в этом рассуждении состоит вот в чем. Когда ракета будет иметь скорость, равную нулю по отношению к Земле, то по отношению к Луне она будет иметь скорость Луны, направленную в обратную сторону.

На рис. 6.9 изображена траектория ракеты, запущенной из точки A. Нарисована также траектория Луны. Можно представить себе, что по ней движется «сфера действия» Луны (внутри этой сферы практически на ракету действует одно лишь притяжение Луны). Когда ракета вошла в сферу действия Луны в точку B, сама Луна находится в точке C и имеет скорость $v_л$, равную 1,02 км/с. Если бы скорость ракеты в точке B по отношению к Земле равнялась нулю, то по отношению к Луне она равнялась бы $-v_л$. При таких условиях мы промахнулись бы.

Рассматривая ракету с Луны, мы можем быть уверены, что она придет под прямым углом к поверхности Луны, если ее скорость равна v. Как же должен поступить математик, рассчитывающий оптимальную траекторию и скорость ракеты? Очевидно он должен добиться того, чтобы ракета попала в точку B не с нулевой скоростью, а со скоростью V, которая также показана на рис. 6.9. А рассчитать ее не трудно с помощью параллелограмма скоростей, изображенного на том же рисунке.

Все же у нас есть некоторая свобода. Не обязательно, чтобы вектор скорости v смотрел на центр Луны. Вдобавок и само притяжение Луны увеличивает допустимые погрешности.

Расчеты показывают, что все эти допущения весьма малы и точность в значениях начальной скорости должна быть порядка нескольких метров в секунду. Угол, под которым отправляется ракета, должен устанавливаться с точностью до десятой градуса, а время отправления не должно отличаться от расчетного более чем на несколько секунд.

Итак, ракета входит в область действия Луны со скоростью, отличной от нуля. Расчет показывает, что эта скорость V должна равняться 0,8 км/с. Притяжение Луны увеличит ее, и встреча с поверхностью произойдет при скорости 2,5 км/с. Разумеется, это не годится — аппарат разрушится при такой встрече. Нет никакого другого выхода, кроме как гасить скорость при помощи тормозной двигательной установки. Чтобы осуществить так называемую мягкую посадку, придется потратить изрядное количество топлива. Формула, которая приведена на стр. 87, показывает, что ракете придется «похудеть» в 2,7 раза.

Если мы желаем вернуться обратно, то ракета после прилунения не должна остаться без топлива. Луна — «маленькое» тело. Ее радиус равен 1737 км, масса равна $7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг. Нетрудно рассчитать, что первая космическая скорость, нужная для создания искусственного спутника Луны, равна 1680 м/с, а вторая — 2375 м/с. Так что для того, чтобы покинуть Луну, требуется придать снаряду скорость около 2,5 км/с. При этой минимальной начальной скорости мы вернемся на Землю через 5 суток со знакомым нам значением скорости около 11 км/с.

Вход в атмосферу Земли должен быть пологим — надо избежать перегрузок, если на борту космического корабля есть люди. Но даже если речь идет о посадке автомата, все равно надо покружиться около Земли, все время сокращая диаметр эллипса, чтобы не перегреть оболочку ракеты.

Экспедиция на Луну с людьми стоит колоссальных денег. Если принять, что на Землю должна вернуться кабина с людьми и приборами массой не менее 5 тонн, то окажется, что начальная масса ракетного комплекса составит 4,5 тысячи тонн. Специалисты полагают, что в течение ближайших 20 лет до разработки новых систем двигателей с высокой скоростью истечения газов полеты с людьми на Луну, а тем более на другие планеты, осуществляться не будут. Впрочем, в справедливости таких прогнозов трудно быть уверенным.

ЕСЛИ БЫ НЕ БЫЛО ЛУНЫ

Мы не будем обсуждать печальные следствия отсутствия Луны для поэтов и влюбленных. Заголовок параграфа надо понимать гораздо прозаичнее: как сказывается присутствие Луны на земной механике.

Когда мы раньше обсуждали, какие силы действуют на лежащую на столе книгу, то уверенно говорили: притяжение Земли и сила реакции. Но, строго говоря, лежащая на столе книга притягивается и Луной, и Солнцем, и даже звездами.

Луна — наш ближайший сосед. Забудем про Солнце и звезды и посмотрим, насколько изменится вес тела на Земле под действием Луны.

Земля и Луна находятся в относительном движении. По отношению к Луне Земля как целое (т. е. все точки Земли) движется с ускорением $\gamma m/r^2$, где m — масса Луны, а r — расстояние от центра Луны до центра Земли.

Рассмотрим тело, лежащее на поверхности Земли. Нас интересует, насколько изменится его вес под действием Луны. Земной вес определяется ускорением по

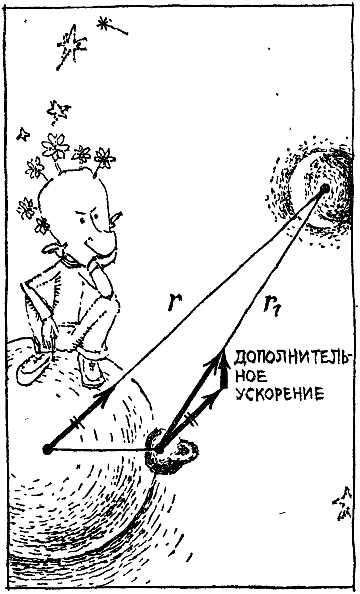


Рис. 6.10.

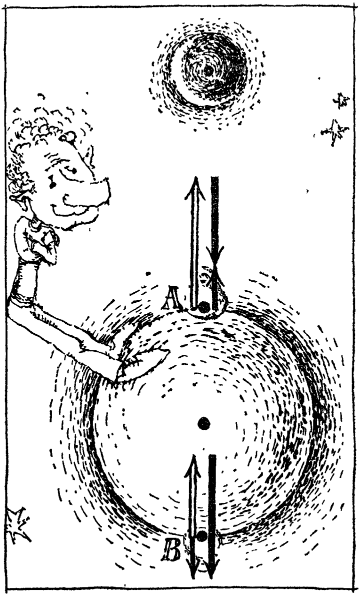


Рис. 6.11.

отношению к Земле. Поэтому, иными словами, нас интересует, насколько изменится под действием Луны ускорение лежащего на земной поверхности тела по отношению к Земле.

Ускорение Земли по отношению к Луне $\gamma m/r^2$; ускорение тела, лежащего на поверхности Земли, по отношению к Луне $\gamma m/r_1^2$, где r_1 — расстояние от тела до центра Луны (рис. 6.10).

А нам нужно найти дополнительное ускорение тела по отношению к Земле: оно будет равно геометрической разности соответствующих ускорений.

Величина $\gamma m/r^2$ — постоянное число для Земли, а $\gamma m/r_1^2$ — разное в разных точках земной поверхности. Значит, и интересующая нас геометрическая разность будет различной для разных мест земного шара.

Какова будет земная тяжесть в наиболее близком к Луне месте, в самом отдаленном от нее и посередине на земной поверхности?

Для нахождения вызванного Луной ускорения тела по отношению к центру Земли, т. е. поправки к земному g, надо из величины $\gamma m/r_1$ в указанных местах земного шара (светлые стрелки на рис. 6.11) вычесть постоянную величину $\gamma m/r^2$. При этом надо помнить, что ускорение $\gamma m/r^2$ — Земли по отношению к Луне — направлено параллельно линии центр Земли — центр Луны. Вычитание вектора равносильно прибавлению обратного вектора. Жирными стрелками на рисунке показаны векторы $-\gamma m/r^2$.

Складывая изображенные на рисунке векторы, мы найдем то, что нас интересует: изменение ускорения свободного падения на поверхности Земли, возникающее благодаря влиянию Луны.

В месте, наиболее близком к Луне, результирующее дополнительное ускорение будет равно:

$$\gamma \frac{m}{(r-R)^2} - \gamma \frac{m}{r^2}$$

и направлено к Луне. Земная тяжесть уменьшается, тело в точке A становится легче, чем при отсутствии Луны.

Имея в виду, что R много меньше r, написанную формулу можно упростить. Приведя к общему знаменателю, получим:

$$\frac{\gamma m R\,(2r-R)}{r^2\,(r-R)^2}.$$

Отбросив в скобках относительно малую величину R, вычитаемую из значительно бóльших величин r или $2r$, получим

$$\frac{2\gamma m R}{r^3}.$$

Перенесемся теперь к антиподам. В точке B ускорение, вызванное Луной, не больше, а меньше общего земного. Но мы находимся теперь на дальней от Луны стороне земного шара. Уменьшение притяжения Луной приводит на этой стороне земного шара к тем же результатам, что увеличение притяжения в точке A — к уменьшению ускорения свободного падения. Не правда ли, неожиданный результат — и здесь тело становится легче под действием Луны. Разность

$$\gamma \frac{m}{(r+R)^2} - \gamma \frac{m}{r^2} \approx -\frac{\gamma m R}{r^3}$$

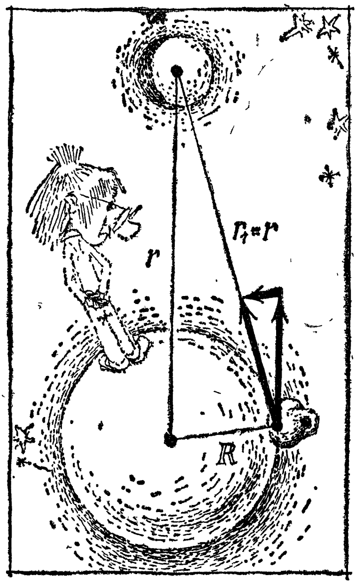


Рис. 6.12.

оказывается по абсолютной величине такой же, как в точке A.

Иначе дело обстоит на средней линии. Здесь ускорения направлены под углом, и вычитание общего ускорения Земли Луною $\gamma m/r^2$ и ускорения Луною лежащего на Земле тела $\gamma m/r_1^2$ надо произвести геометрически (рис. 6.12). Мы ничтожно отойдем от средней линии, если расположим тело на Земле так, чтобы r_1 и r равнялись по величине. Векторная разность ускорений представляет собой основание равнобедренного треугольника. Из подобия треугольников, изображенных на рис. 6.12, видно, что искомое ускорение во столько раз меньше $\gamma m/r^2$, во сколько R меньше r. Значит, искомая добавка к g на средней линии земной поверхности равна

$$\frac{\gamma m R}{r^3};$$

по числовому значению это в два раза меньше ослабления силы земного притяжения в крайних точках. Что же касается направления этого добавочного ускорения, то оно, как это видно из рисунка, и в этом случае практически совпадает с вертикалью в данной точке земной поверхности. Оно направлено вниз, т. е. приводит к увеличению веса.

Итак, влияние Луны на земную механику состоит в изменении веса тел, находящихся на земной поверхности. При этом в наиболее близкой и далекой от Луны точках вес уменьшается, а на средней линии возрастает, причем изменение веса во втором случае в два раза меньше, чем в первом.

Разумеется, проведенные рассуждения верны для любой планеты, для Солнца, для звезд.

Нетрудно подсчитать, что ни планеты, ни звезды не дают и ничтожной доли лунного ускорения.

Сравнить действие любого небесного тела с действием Луны очень легко: надо разделить добавочные ускорения этого тела на «лунный добавок»:

$$\frac{\gamma mR}{r^3} : \frac{\gamma m_Л R}{r_Л^3} = \frac{m}{m_Л} \cdot \frac{r_Л^3}{r^3}.$$

Это отношение не намного меньше единицы лишь для Солнца. Солнце много дальше от нас, чем Луна, но масса Луны в десятки миллионов раз меньше массы Солнца.

Подставив числовые значения, найдем, что под влиянием Солнца земная тяжесть изменяется в 2,17 раза меньше, чем под влиянием Луны.

Прикинем теперь, насколько изменят вес земные тела, если Луна покинет земную орбиту. Подставив числовые значения в выражение $2\gamma mD/r^3$, найдем, что лунное ускорение есть величина порядка 0,0001 см/с, т. е. одной десятимиллионной доли g.

Казалось бы, почти ничего. Стоило ли ради этого ничтожного эффекта с напряжением следить за решением довольно сложной задачи механики? Не торопитесь с подобным заключением. Этот «ничтожный» эффект является причиной мощных приливных волн. Он ежесуточно создает 10^{15} Дж кинетической энергии, перемещая огромные массы воды. Эта энергия равняется энергии, несомой всеми реками земного шара.

Действительно, процентное изменение величины, которое мы рассчитали,— очень маленькое. Тело, ставшее легче на столь же «ничтожную» величину, отдалится от центра Земли. Но ведь радиус Земли — это 6 000 000 м, и ничтожное отклонение будет измеряться десятками сантиметров.

Представьте себе, что Луна остановила свое движение по отношению к Земле и сияет где-то над океаном. Расчет показывает, что уровень воды в этом месте повысится на 54 см. Такой же подъем воды произойдет у антиподов. На средней линии между этими крайними точками уровень воды в океане понизится на 27 см.

Благодаря вращению Земли вокруг своей оси «места» подъемов и опусканий океана все время перемещаются. Это и есть приливы. В течение примерно шести часов происходит подъем уровня воды, вода надвигается на берег — это прилив. Затем наступает отлив, он тоже длится шесть часов. В каждые лунные сутки происходит два прилива и два отлива. Картина приливных явлений сильно осложняется трением частиц воды, формой морского дна и очертанием берегов.

Например, в Каспийском море приливы и отливы невозможны просто потому, что вся поверхность моря одновременно находится в одинаковых условиях.

Также отсутствуют приливы во внутренних морях, соединенных с океаном длинными и узкими проливами,— например Черном, Балтийском.

Особенно большие приливы бывают в узких бухтах, где приливная волна, идущая из океана, сильно повышается. Например, в Гижигинской губе на Охотском море высота прилива достигает нескольких метров.

Если берега океана достаточно плоские (например, во Франции), подъем воды во время прилива может на многие километры изменить положение границы суши и моря.

Приливные явления мешают Земле вращаться. Ведь движение приливных волн связано с трением. На преодоление этого трения — его называют приливным — должна затрачиваться работа. Поэтому энергия вращения, а с ней и скорость вращения Земли около оси, падает.

Это явление и приводит к удлинению суток, о котором шла речь на стр. 10.

Приливное трение позволяет понять, почему Луна обращена к Земле всегда одной и той же стороной.

Когда-то Луна, вероятно, была в жидком состоянии. Вращение этого жидкого шара около Земли сопровождалось сильнейшим приливным трением, которое постепенно замедляло движение Луны. Наконец, Луна перестала вращаться по отношению к Земле, приливы прекратились, и Луна спрятала от нашего взора половину своей поверхности.

Глава 7

ДАВЛЕНИЕ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЕСС

Гидравлический пресс — это старинная машина, но она сохранила свое значение до наших дней.

Посмотрите на рис. 7.1, изображающий гидравлический пресс. В закрытом сосуде с водой могут ходить два поршня — маленький и большой. Если надавить рукой на один поршень, то давление передается другому поршню — он поднимется. Сколько воды вдавит внутрь сосуда первый поршень, столько же воды поднимется над начальной меткой второго поршня.

Если площади поршней S_1 и S_2, а смещения l_1 и l_2, то равенство объемов дает: $S_1 l_1 = S_2 l_2$, или

$$l_1/l_2 = S_2/S_1.$$

Нам нужно узнать условие равновесия поршней.

Это условие мы найдем без труда, исходя из того, что работа уравновешивающихся сил должна равняться нулю. Если так, то при перемещении поршней работы действующих на поршни сил должны быть равны (с обратным знаком). Значит,

$$F_1 l_1 = F_2 l_2, \quad \text{или} \quad F_2/F_1 = l_1/l_2.$$

Сравнивая с предыдущим равенством, мы видим, что

$$F_2/F_1 = S_2/S_1.$$

Это скромное уравнение означает возможность огромного умножения силы. Поршень, передающий давление, может иметь в сотни, в тысячи раз меньшую площадь. Во столько же раз будет отличаться сила, действующая на большой поршень, от мускульной силы.

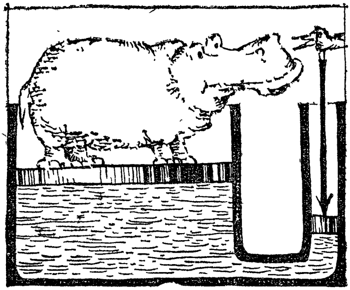


Рис. 7.1.

При помощи гидравлического пресса можно ковать и штамповать металлы, давить виноград, поднимать тяжести.

Конечно, выигрыш в силе будет сопровождаться проигрышем в пути. Чтобы сжать прессом тело на 1 см, придется рукой пройти путь, во столько раз больший, во сколько раз отличаются силы F_2 и F_1.

Отношение F/S физики называют давлением (его обозначают буквой p). Вместо того чтобы говорить: сила в 1 кгс действует на площадь в 1 см², мы будем говорить короче: давление $p=1$ кгс/см². Это давление называют технической атмосферой (1 кгс/см² = 1 ат).

Вместо отношения $\frac{F_2}{F_1}=\frac{S_2}{S_1}$ можно теперь записать:

$$\frac{F_2}{S_2}=\frac{F_1}{S_1}, \quad \text{т. е.} \quad p_1=p_2.$$

Итак, давления на оба поршня одинаковы.

Наше рассуждение не зависит от того, где расположены поршни, будут ли их поверхности горизонтальны, вертикальны или наклонны. Да и вообще дело не в поршнях. Можно мысленно выбрать два любых участка поверхности, заключающей жидкость, и утверждать, что давления на этой поверхности всюду одинаковы.

Оказывается, таким образом, что давление внутри жидкости одинаково во всех ее точках и во всех направлениях. Иначе говоря, на площадку определенного размера действует одинаковая сила, где бы и как ни была расположена площадка. Это положение носит название закона Паскаля.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Закон Паскаля справедлив для жидкостей и газов. Однако он не учитывает одного важного обстоятельства — существования веса.

В земных условиях этого нельзя забывать. Весит и вода. Поэтому понятно, что две площадки, находящиеся на разной глубине под водой, будут испытывать разные давления. Чему же равно это различие? Выделим мысленно внутри жидкости прямой цилиндр с горизонтальными донышками. Вода, находящаяся внутри него, давит на окружающую воду. Полная сила этого давления равна весу mg жидкости в цилиндре (рис. 7.2). Эта полная сила складывается из сил, действующих на основания цилиндра и на его боковую поверхность. Но силы, действующие на противоположные стороны боковой поверхности, равны по величине и противоположны по направлению. Поэтому сумма всех сил, действующих на боковую поверхность, равна нулю. Значит, вес mg будет равен разности сил $F_2 - F_1$. Если высота цилиндра равна h, площадь основания S и плотность жидкости ρ, то вместо mg можно написать ρghS. Этой величине равна разность сил. Для того чтобы получить разность давлений, надо разделить вес на площадь S. Разность давлений оказывается равной ρgh.

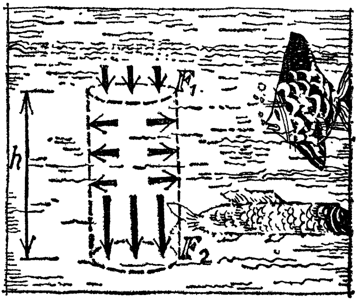


Рис. 7.2.

В соответствии с законом Паскаля давление на разноориентированные, но находящиеся на одной глубине площадки будет одинаково. Значит, в двух точках жидкости, расположенных одна над другой на высоте h, разность давлений будет равна весу столба жидкости, сечение которого равно единице, а высота h:

$$p_2 - p_1 = \rho gh.$$

Давление воды, обусловленное ее тяжестью, называют гидростатическим.

В земных условиях на свободную поверхность жидкости чаще всего давит воздух. Давление воздуха называют атмосферным. Давление на глубине складывается из атмосферного и гидростатического.

Чтобы подсчитать силу давления воды, нужно знать размер площадки, на которую она давит, и высоту

Рис. 7.3.

столба жидкости над ней. Все остальное в силу закона Паскаля не играет роли.

Это может показаться удивительным. Неужели сила, действующая на одинаковые донышки (рис. 7.3) двух изображенных сосудов, одинакова? Ведь в левом много больше воды. Несмотря на это силы, действующие на дно, в обоих случаях равны ρghS. Это больше веса воды в правом сосуде и меньше веса воды в левом сосуде. В левом сосуде боковые стенки берут на себя вес «лишней» воды, а в правом, напротив, добавляют к весу воды силы реакции. Это интересное обстоятельство называют иногда гидростатическим парадоксом.

Если два сосуда разной формы, но с одинаковыми уровнями воды в них соединить трубкой, то вода не будет переходить из одного сосуда в другой. Такой переход мог бы произойти в том случае, если бы давления в сосудах различались. Но этого нет, и в сообщающихся сосудах независимо от их формы жидкость всегда будет находиться на одном уровне.

Напротив, если уровни воды в сообщающихся сосудах различны, то вода начнет перемещаться, и уровни сравняются.

Давление воды много больше давления воздуха. На глубине 10 м давление воды вдвое больше атмосферного, на глубине в 1 км оно равно 100 атмосфер.

Океан в некоторых местах имеет глубину более 10 км. Силы давления воды на таких глубинах исключительно велики. Куски дерева, опущенные на глубину 5 км, уплотняются этим огромным давлением настолько, что после такого «крещения» тонут в бочке с водой, как кирпичи.

Это огромное давление создает большие препятствия исследователям жизни моря. Глубоководные спуски производятся в стальных шарах — так называемых батисферах, или батискафах, которым приходится выдерживать давления выше 1000 атмосфер.

Подводные же лодки могут опускаться лишь на глубину 100—200 м.

ДАВЛЕНИЕ АТМОСФЕРЫ

Мы живем на дне воздушного океана — атмосферы. Каждое тело, любая песчинка, любой предмет, находящийся на Земле, подвержен давлению воздуха.

Атмосферное давление не такое маленькое. На каждый квадратный сантиметр поверхности тела действует сила около 1 кгс.

Причина атмосферного давления очевидна. Как и вода, воздух обладает весом, а значит, оказывает давление, равное (как и для воды) весу столба воздуха, находящегося над телом. Чем выше мы будем подниматься в гору, тем меньше воздуха будет над нами, а значит, тем меньше станет и атмосферное давление.

Для научных и житейских целей нужно уметь измерять давление. Для этого существуют специальные приборы — барометры.

Изготовить барометр нетрудно. В трубку, закрытую с одного конца, наливают ртуть. Зажав пальцем открытый конец, опрокидывают трубку и погружают ее открытым концом в чашечку с ртутью. При этом ртуть в трубке опускается, но не выливается. Пространство над ртутью в трубке, несомненно, безвоздушное. Ртуть поддерживается в трубке давлением наружного воздуха (рис. 7.4).

Каких бы размеров мы ни брали чашечку со ртутью, какого бы диаметра ни была трубка, ртуть всегда поднимется примерно на одну и ту же высоту — 76 см.

Если взять трубку короче 76 см, то она полностью заполнится ртутью, и мы не увидим пустоты. Столб ртути высотой 76 см давит на подставку с той же силой, что и атмосфера. Этот столбик на площадку в 1 см²

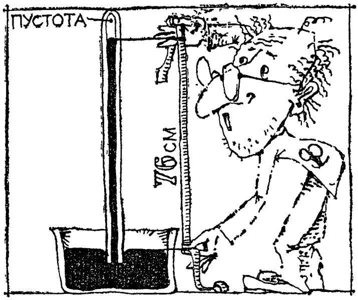


Рис. 7.4.

давит с силой в 1,033 кгс. Эту цифру составляет объем ртути 1×76 см^3, умноженный на ее плотность и на ускорение свободного падения.

Как видите, то среднее или, как говорят, нормальное атмосферное давление, которое испытывает каждый житель Земли, близко к давлению, которое возникает, если на площадку в 1 см^2 мы поставим гирьку в 1 кг.

Для измерения давления пользуются различными единицами. Часто просто указывают высоту столба ртути в миллиметрах. Например, говорят, что сегодня давление выше нормы, оно равно 768 мм рт. ст.

Давление в 760 мм рт. ст. называют иногда физической атмосферой (атм). Поскольку физическая и техническая атмосферы — величины очень близкие, то в дальнейшем мы не будем оговаривать, о какой атмосфере идет речь. Физики часто пользуются также единицей давления бар. 1 бар$=10^6$ дин/см^2. Так как 1 гс$=981$ дин, то 1 бар равен примерно одной атмосфере, точнее, нормальное атмосферное давление примерно равно 1013 миллибар.

В настоящее время системой СИ принята единица давления паскаль (Па), определяемая действием силы в 1 Н на площадку в 1 м^2. Это очень маленькое давление, что видно хотя бы из того, что 1 Па$=$ $=1$ Н/м$^2=10$ дин/см$^2=10^{-5}$ бар.

Вычислив величину земной поверхности по формуле $4\pi R^2$, найдем, что вес всей атмосферы выражается огромной цифрой $5\cdot10^{18}$ кгс.

Барометрической трубке можно придать самые различные формы, важно лишь одно: один конец трубки должен быть закрыт так, чтобы над поверхностью ртути не было воздуха. На другой уровень ртути действует давление атмосферы.

Ртутным барометром можно измерить атмосферное давление с очень большой точностью. Разумеется, не обязательно брать ртуть, годится и любая другая жидкость. Но ртуть — наиболее тяжелая жидкость, и высота столба ртути при нормальном давлении будет наименьшей. Ртутный барометр—не особенно удобный прибор. Нежелательно поверхность ртути оставлять открытой (ртутные пары ядовиты), кроме того, прибор не портативен.

Этих недостатков нет у металлических барометров — анероидов (т. е. безвоздушных). Такой барометр все видели. Это небольшая круглая металлическая коробка со шкалой и стрелкой. На шкалу нанесены величины давления, обычно в сантиметрах ртутного столба.

Из металлической коробки выкачан воздух. Крышка коробки удерживается сильной пружиной, так как иначе она была бы вдавлена атмосферным давлением. При изменении давления крышка либо прогибается, либо выпячивается. С крышкой соединена стрелка, причем так, что при вдавливании стрелка идет вправо.

Такой барометр градуируется сравнением его показаний со ртутным. Если вы хотите узнать давление, не забудьте постучать пальцем по барометру. Стрелка циферблата испытывает большое трение и обычно застревает на «вчерашней погоде».

На атмосферном давлении основано простое устройство — сифон.

Шофер хочет помочь своему товарищу, у которого кончился бензин. Как же отлить бензин из бака своей автомашины? Не наклонять же ее, как чайник.

На помощь приходит резиновая трубка. Один конец ее опускают в бензобак, а из другого конца ртом отсасывают воздух. Затем быстрое движение — открытый конец зажимают пальцем и устанавливают на высоте ниже бензобака. Теперь палец можно отнять — бензин будет выливаться из шланга (см. рис. 7.5).

Изогнутая резиновая трубка и есть сифон. Жидкость в этом случае движется по той же причине, что и в прямой наклонной трубке. В обоих случаях жидкость в конечном счете течет вниз.

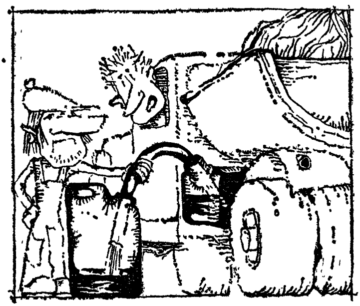


Рис. 7.5.

Для действия сифона необходимо атмосферное давление: оно «подпирает» жидкость и не дает столбу жидкости в трубке разорваться. Если бы атмосферного давления не было, столб разорвался бы в точке перевала, и жидкость скатилась бы в оба сосуда.

Сифон начинает работать, когда жидкость в правом (так сказать, «выливном») колене опустится ниже уровня перекачиваемой жидкости, в которую опущен левый конец трубки. В противном случае жидкость уйдет обратно.

КАК УЗНАЛИ ОБ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Еще древней цивилизации были известны всасывающие насосы. С их помощью можно было поднять воду на значительную высоту. Вода удивительно послушно следовала за поршнем такого насоса.

Древние философы задумывались о причинах этого и пришли к такому глубокомысленному заключению: вода следует за поршнем потому, что природа боится пустоты, поэтому-то между поршнем и водой не остается свободного пространства.

Рассказывают, что один мастер построил для садов герцога Тосканского во Флоренции всасывающий насос, поршень которого должен был затягивать воду на высоту более 10 м. Но как ни старались засосать этим насосом воду, ничего не получалось. На 10 м вода поднималась за поршнем, а дальше поршень отходил от воды, и образовывалась та самая пустота, которой природа боится.

Когда с просьбой объяснить причину неудачи обратились к Галилею, он ответил, что природа действительно не любит пустоты, но до определенного предела. Ученик Галилея Эванджелиста Торричелли, очевидно, использовал этот случай как повод для того, чтобы поставить в 1643 г. свой знаменитый опыт с трубкой, наполненной ртутью. Этот опыт мы только что описали — изготовление ртутного барометра и есть опыт Торричелли.

Взяв трубку высотой более 76 см, Торричелли создал пустоту над ртутью (ее часто называют в его честь торричеллиевой пустотой) и таким образом доказал существование атмосферного давления.

Этим опытом Торричелли разрешил недоумения мастера Тосканского герцога. Действительно, ясно, на протяжении скольких метров вода будет покорно следовать за поршнем всасывающего насоса. Это движение будет продолжаться до тех пор, пока столб воды площадью 1 см^2 не станет равным по весу 1 кгс. Такой столб воды будет иметь высоту 10 м. Вот почему природа боится пустоты..., но не более чем до 10 м.

В 1654 г., спустя 11 лет после открытия Торричелли, действие атмосферного давления было наглядно показано магдебургским бургомистром Отто фон Герике. Известность принесла автору не столько физическая сущность опыта, сколько театральность его постановки.

Два медных полушария были соединены кольцевой прокладкой. Через кран, приделанный к одному из полушариев, из составленного шара был выкачан воздух, после чего полушария невозможно было разнять. Сохранилось подробное описание опыта Герике. Давление атмосферы на полушария можно сейчас рассчитать: при диаметре шара 37 см сила равнялась примерно 1000 кгс. Чтобы разъединить полушария, Герике приказал запрячь две восьмерки лошадей. К упряжи шли канаты, продетые через кольца, прикрепленные к полушариям. Лошади оказались не в силах разъединить полушария.

Силы восьми лошадей (именно восьми, а не шестнадцати, так как вторая восьмерка, запряженная для пущего эффекта, могла быть заменена крюком, вбитым в стену, с сохранением той же силы, действующей на полушария) было недостаточно для разрыва магдебургских полушарий.

Если между двумя соприкасающимися телами имеется пустая полость, то эти тела не будут распадаться благодаря атмосферному давлению.

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ПОГОДА

Колебания давления от погоды имеют очень нерегулярный характер. Когда-то думали, что только одно давление и определяет погоду. Поэтому на барометрах еще и до сих пор ставятся надписи: ясно, сухо, дождь, буря. Встречается даже надпись: «землетрясение».

Изменение давления действительно играет большую роль в изменениях погоды. Но эта роль не решающая. Среднее или нормальное давление на уровне моря равняется 1013 миллибар. Колебания давления сравнительно невелики. Давление редко опускается ниже 935—940 миллибар и поднимается до 1055—1060.

Самое низкое давление наблюдалось 18 августа 1927 г. в Китайском море — 885 миллибар. Самое высокое — около 1080 миллибар — 23 января 1900 г. в Сибири на станции Барнаул (все цифры взяты по отношению к уровню моря).

На рис. 7.6 изображена карта, которой пользуются метеорологи, анализирующие изменения погоды. Проведенные на карте линии называются изобарами. На каждой такой линии давление одинаково (его значение указано цифрой). Обратите внимание на области самого низкого и самого высокого давлений — «вершины» и «ямы» давления.

С распределением атмосферного давления связаны направления и сила ветра.

Давление в разных местах земной поверхности неодинаково, и более сильное давление «выжимает» воздух в места с более низким давлением. Казалось бы, ветер должен дуть в направлении, перпендикулярном к изобарам, т. е. туда, где давление падает наиболее быстро. Однако карты ветров показывают иное. В дела воздушного давления вмешивается кориолисова сила и вносит свою поправку, очень значительную.

Как нам известно, на любое тело, движущееся в северном полушарии, действует кориолисова сила, направленная вправо по движению. Это относится и к частицам воздуха. Выжимаемая из мест большего давления к местам, где давление поменьше, частица должна двигаться поперек изобар, но кориолисова сила отклоняет ее вправо, и направление ветра образует угол примерно в 45° с направлением изобар.

Поразительно большой эффект для такой маленькой силы. Это объясняется тем, что помехи действию силы Кориолиса — трение воздушных слоев — также очень незначительны.

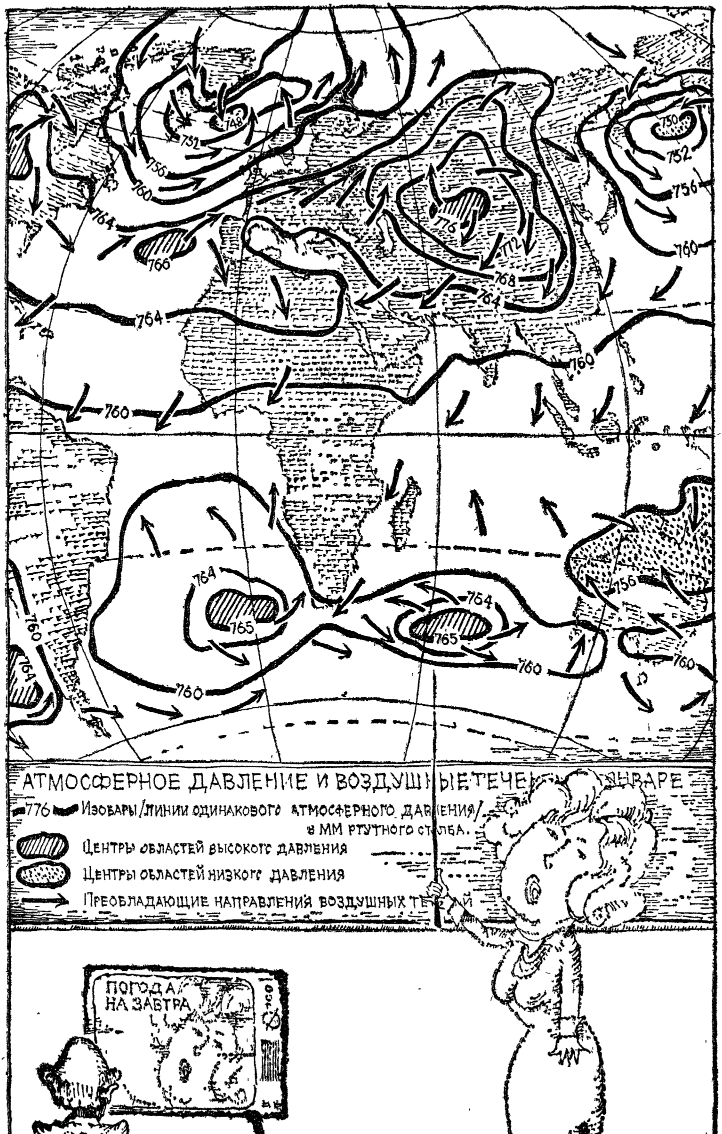

748
752
756
760
764
766
764
760
776
772
768
764
750
752
756
760
760
764
765
764
765
760
760
764
756
760
760
АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ВОЗДУШНЫЕ ТЕЧЕН
ЯНВАРЕ
776 Изобары /линии одинакового атмосферного давления/
в мм ртутного столба.
Центры областей высокого давления
Центры областей низкого давления
Преобладающие направления воздушных те
ий
ПОГОДА НА ЗАВТРА

Рис. 7.6.

Еще более интересно влияние силы Кориолиса на направление ветров в «вершинах» и «ямах» давления. Из-за действия кориолисовой силы воздух, отходя от «вершины» давления, не стекает во все стороны по радиусам, а движется по кривым линиям — спиралям. Эти спиральные воздушные потоки закручиваются в одну и ту же сторону и создают в области высокого давления круговой вихрь, перемещающий воздушные массы по часовой стрелке. Рис. 2.16 (см. стр. 78) отчетливо показывает, как радиальное движение превращается в спиральное при действии постоянной отклоняющей силы.

То же самое происходит и в области пониженного давления. При отсутствии силы Кориолиса воздух стекался бы к этой области равномерно по всем радиусам. Однако по дороге воздушные массы отклоняются вправо. В этом случае, как ясно из рисунка, образуется круговой вихрь, движущий воздух против часовой стрелки.

Ветры в области низкого давления называются циклонами, ветры в области высокого давления называются антициклонами.

Не надо думать, что всякий циклон означает ураган или бурю. Прохождение циклонов или антициклонов через город, где мы живем,— обычное явление, связанное, правда, большей частью с переменой погоды. Во многих случаях приближение циклона означает наступление ненастья, а приближение антициклона — наступление хорошей погоды.

Впрочем, мы не будем становиться на путь прорицателей погоды.

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ С ВЫСОТОЙ

С изменением высоты давление падает. Впервые это было выяснено французом Перье по поручению Паскаля в 1648 г. Гора Пью де Дом, около которой жил Перье, была высотой 975 м. Измерения показали, что ртуть в торричеллиевой трубке падает при подъеме на гору на 8 мм.

Вполне естественно падение давления воздуха с увеличением высоты. Ведь наверху на прибор уже давит меньший столб воздуха.

Если вы летали в самолете, то знаете, что на передней стенке кабины помещен прибор, показывающий с точностью до десятков метров высоту, на которую поднялся самолет. Прибор называется альтиметром. Это обычный барометр, но проградуированный на значения высот над уровнем моря.

Давление падает с возрастанием высоты; найдем формулу этой зависимости. Выделим небольшой слой воздуха площадью в 1 см², расположенный между высотами h_1 и h_2. В не очень большом слое изменение плотности с высотой мало заметно. Поэтому вес выделенного объема (это цилиндрик высотой $h_2 - h_1$ и площадью 1 см²) воздуха будет

$$mg = \rho(h_2 - h_1)\,g.$$

Этот вес и дает падение давления при подъеме с высоты h_1 на высоту h_2. То есть

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g\,(h_2 - h_1).$$

Но по закону Бойля — Мариотта, который читателю известен (а если нет, то он узнает о нем в книге 2), плотность газа пропорциональна давлению. Поэтому

$$\frac{p_1 - p_2}{p} \sim (h_2 - h_1).$$

Слева стоит доля, на которую возросло давление при снижении с h_2 до h_1. Значит, одинаковым снижениям $h_2 - h_1$ будет соответствовать прирост давления на один и тот же процент.

Измерения и расчет показывают в полном согласии, что при подъеме над уровнем моря на каждый километр давление будет падать на 0,1 долю. То же самое относится и к спуску в глубокие шахты под уровень моря — при опускании на один километр давление будет возрастать на 0,1 своего значения.

Речь идет об изменении на 0,1 от значения на предыдущей высоте. Это значит, что при подъеме на один километр давление уменьшается до 0,9 от давления на уровне моря, при подъеме на следующий километр оно становится равным 0,9 от 0,9 давления на уровне моря; на высоте в 3 км давление будет равно 0,9 от 0,9 от 0,9, т. е. $(0,9)^3$ давления на уровне моря. Нетрудно продлить это рассуждение и далее.

Обозначая давление на уровне моря через p_0, можем записать давление на высоте h (выраженной в километрах):

$$p = p_0 (0,87)^h = p_0 \cdot 10^{-0,06h}.$$

В скобках записано более точное число: 0,9 — это округленное значение. Формула предполагает температуру одинаковой на всех высотах. На самом же деле температура атмосферы меняется с высотой и притом по довольно сложному закону. Тем не менее формула дает неплохие результаты, и на высотах до сотни километров ею можно пользоваться.

Нетрудно определить при помощи этой формулы, что на высоте Эльбруса — около 5,6 км — давление упадет примерно вдвое, а на высоте 22 км (рекордная высота подъема стратостата с людьми) давление упадет до 50 мм рт. ст.

Когда мы говорим про давление 760 мм рт. ст. — нормальное, не нужно забывать добавить: «на уровне моря». На высоте 5,6 км нормальным давлением будет не 760, а 380 мм рт. ст.

Вместе с давлением по тому же закону падает с возрастанием высоты и плотность воздуха. На высоте 160 км воздуха останется маловато.

Действительно,

$$(0,87)^{160} = 10^{-10}.$$

У земной поверхности плотность воздуха равна примерно 1000 г/м^3, значит, на высоте 160 км на 1 м^3 должно приходиться по нашей формуле 10^{-7} г воздуха. На самом же деле, как показывают измерения, произведенные при помощи ракет, плотность воздуха на этой высоте раз в десять больше.

Еще большее занижение против истины дает наша формула для высот в несколько сот километров. В том, что формула становится непригодной на больших высотах, виновато изменение температуры с высотой, а также особое явление — распад молекул воздуха под действием солнечного излучения. Здесь мы не станем на этом останавливаться.

ЗАКОН АРХИМЕДА

Подвесим гири к старинным пружинным весам. Их до сих пор иногда еще можно встретить на рынках. Называются они безменами. Пружина растянется и покажет вес гири. Не снимая гири с безмена, опустим ее в воду. Изменится ли показание безмена? Да, вес тела как бы уменьшится. Если опыт проделать с килограммовой железной гирей, то «уменьшение» веса составит примерно 140 граммов.

В чем же дело? Ведь ясно, что ни масса гири, ни притяжение ее Землей не могли измениться. Причина потери веса может быть лишь одна: на гирю, опущенную в воду, действует вверх сила в 140 гс. Откуда же берется эта выталкивающая сила, открытая великим ученым древности Архимедом? Прежде чем рассматривать твердое тело в воде, рассмотрим «воду в воде». Выделим мысленно произвольный объем воды. Этот объем обладает весом, но на дно не падает. Почему? Ответ ясен — этому препятствует гидростатическое давление окружающей воды. Это значит, что результирующая этого давления в рассматриваемом объеме равна весу воды и направлена вертикально вверх.

Если теперь этот же объем занять твердым телом, то ясно, что гидростатическое давление останется тем же.

Итак, на тело, погруженное в жидкость, в результате гидростатического давления действует сила, направленная вертикально вверх и численно равная весу вытесненной телом воды. Это и есть закон Архимеда.

Рассказывают, что Архимед лежал в ванне и размышлял о том, как узнать, есть ли примесь серебра в золотой короне. Выталкивающую силу человек отчетливо ощущает, принимая ванну. Закон неожиданно открылся Архимеду, представился в своей замечательной простоте. С возгласом «Эврика!» (что значит «нашел») Архимед выскочил из ванны и побежал в комнаты за драгоценной короной, чтобы немедленно определить потерю ее веса в воде.

Потеря веса тела в воде, будет равна весу вытесненной телом воды. Зная вес воды, сразу же определим ее объем, который равен объему короны. Зная вес короны, можно сразу же найти плотность вещества, из ко-

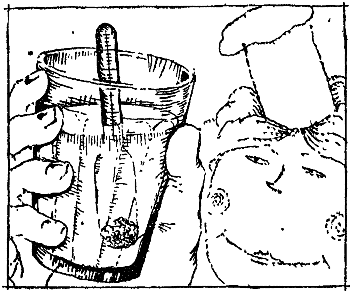


Рис. 7.7.

торого она сделана, и, зная плотности золота и серебра, найти долю примеси.

Закон Архимеда справедлив, разумеется, для любой жидкости. Если в жидкость плотности ρ погружено тело объема V, то вес вытесненной жидкости — а это и есть выталкивающая сила — будет равен $\rho g V$.

На законе Архимеда основано действие простых приборов, контролирующих свойства жидких продуктов. Если спирт или молоко разбавить водой, то плотность их изменится, а по плотности можно судить о составе. Такое измерение просто и быстро производится при помощи ареометра (рис. 7.7). Опущенный в жидкость ареометр погружается на бо́льшую или меньшую глубину в зависимости от ее плотности.

Ареометр будет находиться в равновесии, когда архимедова сила станет равной весу ареометра.

На ареометр нанесены деления, и плотность жидкости прочитывается по метке, которая приходится на уровень жидкости. Ареометры, применяемые для контроля спирта, называют спиртомерами, для контроля молока — лактометрами.

Средняя плотность тела человека несколько больше единицы. В пресной воде не умеющий плавать тонет. Соленая вода обладает плотностью больше единицы. В большинстве морей соленость воды незначительная, и плотность воды хотя и больше единицы, но меньше средней плотности человеческого тела. Плотность воды в заливе Кара-Богаз-Гол в Каспийском море — 1,18. Это больше средней плотности человеческого тела. В этом заливе утонуть нельзя. Можно лечь на воду и читать книгу.

Лед плавает на воде. Предлог «на», впрочем, здесь не вполне уместен. Плотность льда примерно на 10% меньше плотности воды, поэтому из закона Архимеда следует, что кусок льда погружен в воду примерно на 0,9 своего объема. Именно это обстоятельство делает столь опасной встречу морских судов с айсбергами.

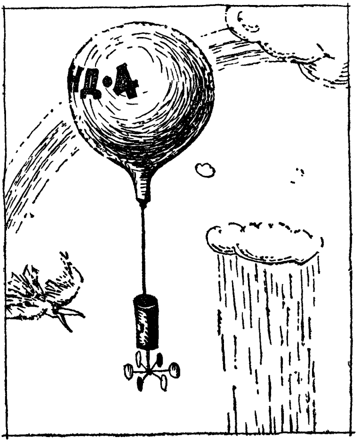


Рис. 7.8.

Если рычажные весы уравновешены в воздухе, то это не значит, что они будут уравновешены и в пустоте. Закон Архимеда относится к воздуху в такой же степени, как и к воде. На тело, находящееся в воздухе, действует выталкивающая сила, равная весу воздуха в объеме тела. В воздухе тело «весит» меньше, чем в пустоте. Потеря веса будет тем больше, чем больше объем. Тонна дерева теряет больше веса, чем тонна свинца. На шуточный вопрос, что легче, имеется такой же ответ: тонна свинца тяжелее тонны дерева, если их взвешивать в воздухе.

Потеря веса в воздухе невелика, пока речь идет о небольших телах. Однако взвешивая кусок размером с комнату, мы «потеряли» бы несколько десятков килограммов. При точном взвешивании поправка на потерю веса тел больших размеров в воздухе должна учитываться.

Архимедова сила в воздухе позволяет строить воздушные шары, аэростаты и дирижабли разных видов. Для этого нужно иметь газ легче воздуха.

Если шарик объемом 1 м^3 наполнить водородом, вес 1 м^3 которого равен 0,09 кгс, то подъемная сила — разность архимедовой силы и тяжести газа — будет равна:

$$1{,}29 \text{ кгс} - 0{,}09 \text{ кгс} = 1{,}20 \text{ кгс},$$

1,29 кг/м^3 — плотность воздуха.

Значит, к такому шару можно подвесить около килограмма груза, и это не помешает ему полететь за облака.

Ясно, что при относительно небольших объемах — в несколько сот кубических метров — водородные шары способны поднять в воздух значительный груз.

Серьезный недостаток водородных аэростатов — горючесть водорода. Вместе с воздухом водород образует взрывчатую смесь. В истории создания аэростатов отмечены трагические случаи.

Поэтому когда был найден гелий, им стали заполнять воздушные шары. Гелий в два раза тяжелее водорода, и подъемная сила наполненного им шара меньше. Однако будет ли это различие существенным? Подъемная сила шара в 1 м³, наполненного гелием, найдется как разность 1,29 кгс—0,18 кгс=1,11 кгс. Подъемная сила уменьшилась всего лишь на 8%. В то же время достоинства гелия очевидны.

Аэростат был первым аппаратом, при помощи которого люди поднялись в воздух. Аэростаты с герметически закрытой гондолой для исследования верхних слоев атмосферы применяются до настоящего времени. Они называются стратостатами. Стратостаты поднимались на высоту больше 20 км.

В настоящее время широко применяются воздушные шары, снабженные различной измерительной аппаратурой и оповещающие о результатах своих измерений по радио (рис. 7.8). Такие радиозонды несут на себе миниатюрный радиопередатчик с батарейками, который сообщает условными сигналами о влажности, температуре и давлении атмосферы на разных высотах.

Можно отправить неуправляемый аэростат в далекое путешествие и довольно точно определить, где он приземлится. Для этого надо, чтобы аэростат поднялся на большую высоту, порядка 20—30 км. На этих высотах воздушные течения очень устойчивы, и путь аэростата может быть рассчитан заранее достаточно хорошо. При необходимости можно автоматически менять подъемную силу аэростата, выпуская газ или сбрасывая балласт.

Раньше для воздушных полетов применяли аэростаты, на которых был установлен мотор с винтом. Таким аэростатам — их называют дирижаблями (что значит «управляемые») — придавали обтекаемую форму. Дирижабли не выдержали конкуренции с самолетами; по сравнению даже с самолетами 30-летней давности они громоздки, неудобны в управлении, медленно движутся, имеют «низкий потолок». Впрочем есть мнение, что для грузовых перевозок дирижабли могут оказаться выгодными.

ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫЕ ДАВЛЕНИЯ. ВАКУУМ

Пустой в техническом смысле сосуд содержит еще огромное число молекул.

Во многих физических приборах молекулы газа являются существенной помехой. Радиолампы, рентгеновские трубки, ускорители элементарных частиц — все эти приборы нуждаются в вакууме *), т. е. в свободном от молекул газа пространстве. Вакуум должен быть и в обычной электрической лампочке. Если в лампочку попадет воздух, нить лампы окислится и перегорит немедленно.

В лучших вакуумных приборах имеется вакуум порядка 10^{-8} мм рт. ст. Казалось бы, совершенно ничтожное давление: на стомиллионную долю миллиметра сдвинулся бы уровень ртути в манометре при изменении давления на такую величину.

Однако при этом мизерном давлении в 1 см³ находится еще несколько сот миллионов молекул.

С этим вакуумом интересно сравнить пустоту межзвездного пространства — там на несколько кубических сантиметров приходится в среднем одна элементарная частица вещества.

Для получения вакуума применяются специальные насосы. Обычный насос, удаляющий газ путем движения поршня, может создать вакуум не более 0,01 мм рт. ст. Хороший, или, как говорят, высокий, вакуум можно получить при помощи так называемых диффузионных насосов — ртутных или масляных, в которых молекулы газа захватываются струей ртутного или масляного пара.

Ртутные насосы, носящие имя их изобретателя Лэнгмюра, начинают работать лишь после предварительной откачки до давлений около 0,1 мм рт. ст. такое предварительное разрежение называют форвакуумом.

Принцип действия заключается в следующем. Небольшой стеклянный объем сообщается с сосудом со ртутью, откачиваемым пространством и форвакуумным насосом. Ртуть подогревается, и форвакуумный насос

*) Слово «вакуум» латинское; «vacuum» в переводе на русский язык — пустота.

увлекает ее пары. По дороге ртутные пары захватывают молекулы газа и доставляют их к форвакуумному насосу. Атомы ртути конденсируются в жидкость (предусмотрено охлаждение проточной водой), которая стекает в тот сосуд, откуда ртуть начала путешествие.

Достигаемый в лабораторных условиях вакуум, как мы сказали только что,— это еще далеко не пустота в абсолютном значении слова. Вакуум — это сильно разреженный газ. Свойства этого газа могут существенно отличаться от свойств обычного газа.

Движение молекул, «образующих вакуум», меняет свой характер, когда длина свободного пробега молекулы становится больше размеров сосуда, в котором находится газ. Тогда молекулы редко сталкиваются между собой и совершают свое путешествие прямыми зигзагами, ударяясь то об одну, то о другую стенку сосуда. Подробно о движении молекул речь пойдет в книге 2. Однако, забегая вперед, вычислим, при каком давлении это будет. Читатель знает, что в воздухе при атмосферном давлении длина пробега равна $5\cdot10^{-6}$ см. Если увеличить ее в 10^7 раз, то она составит 50 см, т. е. будет заметно больше среднего по размерам сосуда. Поскольку длина пробега обратно пропорциональна плотности, а следовательно, и давлению, то давление для этого должно составлять 10^{-7} атмосферного или примерно 10^{-4} мм рт. ст.

Даже межпланетное пространство не является совсем пустым. Но плотность вещества в нем составляет около $5\cdot10^{-24}$ г/см^3. Основная доля межпланетного вещества — атомарный водород. В настоящее время считается, что в космосе приходится по нескольку атомов водорода на 1 см^3. Если увеличить молекулу водорода до размеров горошины и поместить такую «молекулу» в Москве, то ее ближайшая «космическая соседка» окажется в Туле.

ДАВЛЕНИЕ В МИЛЛИОНЫ АТМОСФЕР

С большими давлениями, приходящимися на маленькие площадки, мы сталкиваемся каждодневно. Прикинем, например, каково давление, приходящееся на конец иглы. Положим, что кончик иглы или гвоздя имеет линейный размер 0,1 мм. Это значит, что площадь острия будет равна 0,0001 см². Если на такой гвоздик подействовать совсем небольшой силой — в 10 кгс, то кончик гвоздика окажет давление в 100 000 атмосфер. Немудрено, что острые предметы так легко проникают в глубь плотных тел.

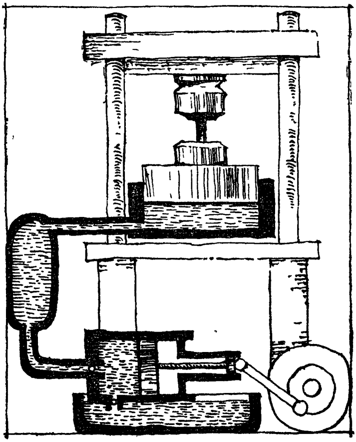


Рис. 7.9.

Из этого примера следует, что создание больших давлений на малых площадях есть вещь вполне обычная. Совсем иначе обстоит дело, если речь идет о создании высоких давлений на большой поверхности.

Создание высоких давлений в лабораторных условиях осуществляется при помощи сильных прессов, например гидравлических (рис. 7.9). Усилие пресса передается поршеньку небольшой площади, он вталкивается в сосуд, внутри которого хотят создать высокое давление.

Таким образом можно без особого труда создать давления в несколько тысяч атмосфер. Для получения же сверхвысоких давлений опыт приходится усложнять, так как материал сосуда таких давлений не выдержит.

Природа здесь пошла нам навстречу. Оказывается, что при давлениях порядка 20 000 атмосфер металлы существенно упрочняются. Поэтому аппарат для получения сверхвысоких давлений погружают в жидкость, находящуюся под давлением порядка 30 000 атмосфер. В этом случае удается создать во внутреннем сосуде (опять-таки поршнем) давления в несколько сот тысяч атмосфер. Наиболее высокое давление — 400 000 атмосфер — было получено американским физиком Бриджменом.

Интерес к получению сверхвысоких давлений совсем не праздный. При таких давлениях могут происходить явления, которые невозможно вызвать иным способом. В 1955 г. были получены искусственные алмазы. Для этого понадобилось давление в 100 000 атмосфер и вдобавок температура свыше 2000 К.

Сверхвысокие давления порядка 300 000 атмосфер на больших площадях образуются при взрывах твердых и жидких взрывчатых веществ — нитроглицерина, тротила и пр.

Несравненно более высокие давления, достигающие 10^{13} атмосфер, возникают внутри атомной бомбы при взрыве.

Давления при взрыве существуют очень короткое время. Постоянные высокие давления имеются в глубинах небесных тел, в том числе, конечно, и в глубине Земли. Давление в центре земного шара равно примерно 3 миллионам атмосфер.

Лев Давидович Ландау
Александр Исаакович Китайгородский

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

Книга 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕЛА

М., 1978 г., 208 стр. с илл.

Редактор Н. А. Михалина
Художник П. И. Чернуский
Художественный редактор Т. Н. Кольченко
Технический редактор В. Н. Кондакова
Корректоры О. А. Бутусова, Н. Д. Дорохова

ИБ № 11158

Сдано в набор 9/IX 1977 г. Подписано к печати 2/I 1978 г. Бумага $84 \times 108^1/_{32}$. Физ. печ. л. 6,5. Условн. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 10,19. Тираж 400 000 экз. (2-й завод 300 001—400 000). Т-00501. Цена книги 40 коп. Заказ № 1893.

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28

Издательство «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

Цена 40 коп.