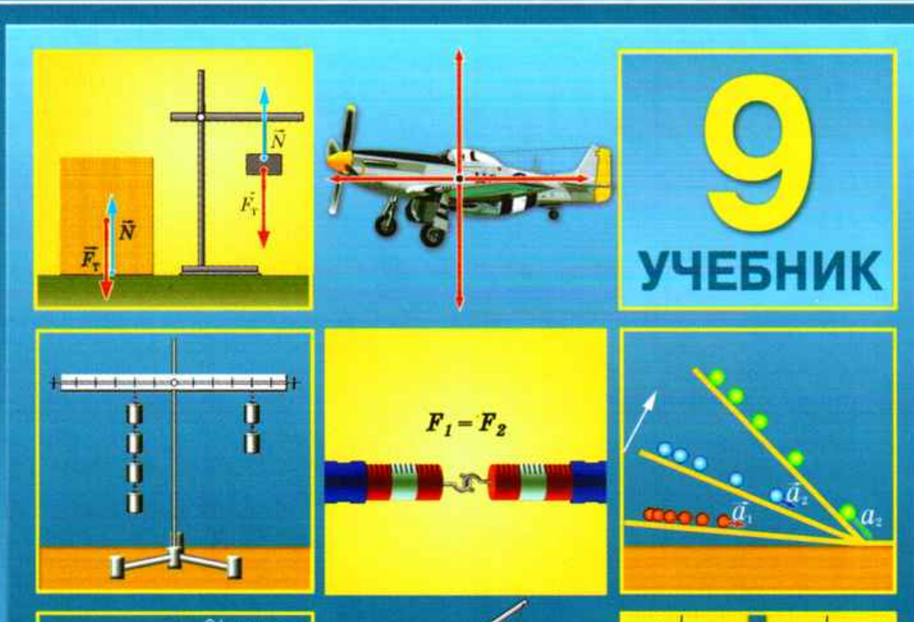
Н. М. Шахмаев, А. В. Бунчук

ФИЗИКА



9

УЧЕБНИК

ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

Эпоха создания классической механики (имена и факты)

1600-е годы | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 1700-е годы | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90

Утверждение капитализма в Западной Европе и Северной Америке
Культура Возрождения — величайший переворот в искусстве, науке, общественном сознании
Английская буржуазная революция
Тридцатилетняя война
Воссоединение Украины с Россией
Первая академия наук (в Риме)
И. Ньютон (1643—1727)
Гринвичская обсерватория
Лондонское королевское общество (ведущее научное учреждение Великобритании)
Первый журнал ученых (Париж)
Государственная библиотека в Берлине
Английская энциклопедия
Северная война
Основание Петербурга
Первая российская печатная газета
М. Ломоносов (1711—1765)
Основание Российской академии наук
Обсерватория в Индии
Первая книга в России по истории науки и техники
Семилетняя война
Основание Московского университета
Основание издательства учебной литературы в Праге
Первый учебник физики на русском языке, переведенный Ломоносовым
Французская энциклопедия
Русско-турецкие войны
Образование США
Великая французская революция
Декларация прав человека и гражданина

Ришелье *Кромвель* *Кольбер* *Пётр I* *Румянцев* *Спиридов* *Ушаков* *Вашингтон* *Джефферсон* *Суворов* *Мирабо* *Дантон* *Марат* *Робеспьер* *Шометт* *Гош* *Клебер*

Сервантес *Шекспир* *Лопе де Вега* *Мольер* *Лафонтен* *Дефо* *Свифт* *Ломоносов* *Гёте* *Шиллер* *Фонвизин* *Скотт*
Найдено «Слово о полку Игореве»

Собор св. Петра в Риме *Рубенс* *Ван Дейк* *Рембрандт* *Веласкес* *Вивальди* *Бах* *Гендель* *Растрелли* *Глюк* *Баженов* *Казаков* *Моцарт* *Давид* *Руже де Лилль*

Ф. Бэкон *Кампанелла* *Декарт* *Коменский* *Спиноза* *Локк* *Лейбниц* *Беллерс* *Монтескье* *Вольтер* *Дидро* *Руссо* *Франклин* *Смит* *Новиков* *Песталоцци* *Кант* *Радищев*

Кеплер *Торричелли* *Паскаль* *Декарт* *Гюйгенс* *Гук* *Бойль* *Лейбниц* *Я. Бернулли*
Основы теории вероятностей
Первый каталог звезд, их положения
Ломоносов *Эйлер* *Линней* *Франклин* *Кавендиш* *Дж. Уатт* *Лавуазье* *Карно*
Метрическая система (Франция)
Формирование географических наук
Ньютон. «Математические начала натуральной философии» (естествознания)
Химические открытия: получение углекислого газа; открыт азот, определены содержание кислорода в атмосферном воздухе и составе воды
Учение о кровообращении
Основы сравнительной анатомии
Дифференциальное исчисление
Ньютоновская физика завоевала решающие позиции в науке
Становление новой науки — физиологии
Основы кристаллографии
Механическая прялка
Рождение науки палеонтологии
Первый вакуумный насос
Паровой котел Папена
Первая карта Луны
Объяснение природы Млечного Пути
Первая фабрика (Англия)
Метод пудлингования
Первый полет на воздушном шаре
Механический ткацкий станок
Основы начертательной геометрии

Изучение растительного и животного мира Америки и Азии
Открытие Австралии Янсзоном
де Фриз *Тасман* *Дежнев* *Хабаров*
Описание Чили и Перу
Картографическое и геодезическое описание Китая
Атласов
Ботанические экспедиции в Юж. Америку
Беринг *Чириков* *Крашенинников*
Исследования Восточной Африки
Кук *Лаперуз*
Первые сведения об Аляске (от русских путешественников)
Географическое описание Америки

Натуральное хозяйство
Развитие товарно-денежных отношений
Цехи ремесленников
Простая кооперация
Мануфактура
Начало промышленного переворота в Англии.
Переход от мануфактуры к фабрике.
Великое событие в развитии цивилизации — рождение науки технологии, использующей всю совокупность естественно-научных знаний для построения эффективных производственных процессов

Н. М. Шахмаев, А. В. Бунчук

ФИЗИКА

9 класс

УЧЕБНИК
для общеобразовательных учреждений

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*

4-е издание, стереотипное

ИЗДАТЕЛЬСТВО МНЕМОЗИНА

Москва 2011

Предисловие

Вы приступаете к изучению важной и интересной науки механика. Механика — раздел физики, а физика — наука экспериментальная. Поэтому изучение физического явления, как правило, начинается с демонстрации опытов, или, когда это невозможно, с их описания. Наблюдая учебную физическую демонстрацию, необходимо понять, с какой целью показал ее учитель. Для этого надо постараться уловить техническую идею, заложенную в экспериментальной установке, не пропустить важных деталей в ходе опыта, увидеть результаты и понять выводы. Некоторые из изучаемых явлений встречаются в повседневной жизни. Важно уметь увидеть и распознать физическое явление в быту. Это развивает наблюдательность. С помощью нехитрых приспособлений простые опыты можно поставить самостоятельно в домашних условиях. Не упускайте такую возможность: это тренирует экспериментальные навыки.

Тем не менее для усвоения изучаемого материала недостаточно увидеть опыты, услышать объяснение учителя. Требуется еще продумать увиденное, поразмыслить над услышанным. Учеба — это творческий труд, в котором необходимы настойчивость и прилежание. Если на уроке вы что-то не поняли, не стесняйтесь попросить учителя объяснить еще раз. «Кто много спрашивает, тот много знает», — гласит народная мудрость.

Большую помощь в поисках ответов на интересующие вас вопросы окажет учебник. Для этого читать его следует очень внимательно, вникая в смысл каждой фразы. Читая учебник, желательно делать краткие и четкие записи. Ваши записи должны содержать самое главное — определения, выводы формул, формулировки законов, единицы физических величин, схемы опытов и графики. Одна из главных частей учебника рисунки, неразрывно связанные с текстом. Необходимо их внимательно рассматривать и обдумывать.

Окончив изучение той или иной главы, ознакомьтесь с краткими выводами из нее. После этого ответьте на вопросы и решите предлагаемые задачи.

Решение задач имеет исключительное значение для изучения физики. Решая задачу, вы не только вспоминаете и закрепляете в памяти изученный материал, но и учитесь творчески применять ваши знания. Умение решать задачи вырабатывается постепенно и лишь в процессе самостоятельного их решения. Главное — не отчаиваться при неудачах!

МЕХАНИКА

Механика — это наука о механическом движении материальных тел и взаимодействиях между ними. Название «механика» происходит от греческого слова *mēchanikē*, что означает «искусство построения машин».

Первые простейшие механизмы появились в древности. Палка – первое из орудий, использованных человеком, представляет собой рычаг. В каменном топоре рычаг сочетается с клином. В бронзовом веке появилось колесо, позднее начали применять наклонную плоскость.

Наука механика возникла в ответ на потребность практики. С одной стороны, ремесленное производство, строительство плотин и мостов, судов и других сооружений способствовали накоплению знаний о механических явлениях, а с другой стороны, для их совершенствования и развития требовались новые знания. Для успешного ведения военных действий уже в V в. до н. э. афинской армией в Пелопонесской войне были применены стенобитные машины (тараны) и метательные приспособления (баллисты и катапульты).

Слово «механика» впервые введено в науку в сочинении Аристотеля «Физика» (IV в. до н. э.). В нем были суммированы знания о механических явлениях, дошедшие до нас в виде описания простейших машин и механизмов в более ранних сочинениях (трактатах) ученых древней Греции.

Начало развития механики как науки относят к III в. до н. э., когда древнегреческий ученый Архимед сформулировал закон равновесия рычага и условие плавания тел. Вклад Архимеда в развитие науки замечателен тем, что он впервые применил математику для описания и анализа механических явлений.

С именем выдающегося итальянского ученого Г. Галилея, экспериментальным путем установившего законы падения тел и колебаний маятника, связан следующий этап в развитии механики. Г. Галилей сформулировал один из основных законов механики — закон инерции.

Опираясь на работы Галилея и наблюдения астрономов, а также на свои собственные исследования, английский физик И. Ньютон создал цельное учение о взаимодействии тел как причине механического движения, которое теперь называют классической, или ньютоновской механикой.

Зачем надо знать механику?

Не изучив механику, невозможно понять ни одно явление природы, так как любое явление окружающего нас мира связано с тем или иным видом движения.

Знание механики необходимо для понимания принципов устройства и работы разнообразных машин и механизмов, для их правильного и эффективного применения, конструирования и усовершенствования. Это касается как бытовых технических устройств (например, пылесоса), так и сложнейших (например, космического корабля).

Механика как наука возникла раньше других разделов физики. Методы изучения явлений природы и основные понятия механики используют не только в других разделах физики, но и в родственных науках, таких как астрономия, космонавтика, электро- и радиотехника. Механику можно по праву назвать фундаментом физики и других наук, а без знания фундамента невозможно усвоить все остальное.

глава 1

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

§ 1. Основные понятия кинематики

Первый раздел механики — кинематика — изучает, как движется тело (*kinēmatos* в переводе с греческого означает «движение»), предлагает способы описания движения, но не отвечает на вопрос, почему одно тело движется так, а другое иначе.

В обыденной жизни под словом «тело» подразумевают тело человека или животного. Физики называют *физическим телом* (или просто *телом*) всякий предмет. К физическим телам можно отнести, например, каплю воды, дерево, самолет, искусственный спутник Земли и саму Землю. Каждое тело в любой момент времени занимает определенное положение в пространстве относительно других тел. Если с течением времени положение тела не изменяется, то говорят, что тело находится в покое. Например, находятся в покое книга, лежащая на столе, стол, стоящий в комнате, сама комната в доме, а также дом. Неподвижны и машины на автостоянке, неработающие краны на стройке, самолеты в ангарах и т. д.

Если с течением времени положение тела изменяется, то это значит, что тело совершает механическое движение.

Механическим движением тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Обратите внимание на слова «относительно других тел». Они означают, что для того, чтобы говорить о механическом движении, в пространстве должно быть, по крайней мере, два тела: то, за которым наблюдают, и то, относительно которого рассматривается положение первого тела. Вторым телом может быть любое тело, например, сам наблюдатель. Если второго тела нет, говорить о движении одного-единственного тела в пустом пространстве невозможно.

Тело, относительно которого рассматривается движение других тел, называют *телом отсчета*.

Допустим, что автомобиль едет по шоссе (рис. 1). В этом случае за тело отсчета могут быть приняты дом или любое дерево. Телом отсчета может служить и другой движущийся автомобиль.

Рассматривая движение относительно того или иного тела отсчета, мы мысленно помещаем себя на его место и считаем себя вместе с телом

Рис. 1

отсчета покоящимися, тогда как все остальные тела так или иначе движутся относительно нас. Любой человек, бессознательно считая себя телом отсчета, наблюдает за сложными движениями окружающих его тел.

Система отсчета. Из курса математики известно, что положение любой точки в нашем трехмерном пространстве описывается тремя ее координатами x, y, z (рис. 2).

Если движение точки происходит по прямой, то для описания ее положения достаточно одной координатной оси, например OX, которую совмещают с этой прямой (рис. 3). Тогда положение точки в данный момент времени (точка A_1) определяется координатой x_1, т. е. расстоянием от точки A_1 до выбранного на этой оси начала координат. В другой момент времени точка может занимать другое положение (точка A_2), которое характеризуется координатой x_2. Таким образом, если положение точки с течением времени изменяется, то изменяется и ее координата, у покоящейся же точки координата остается неизменной во времени.

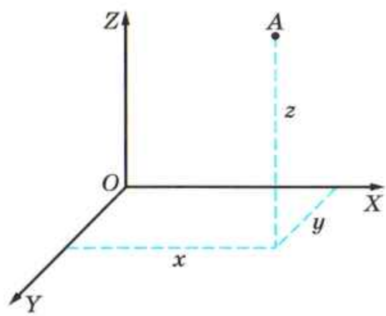


Рис. 2

Часто оказывается, что для описания положения точки одной координатной осью не обойтись, тогда приходится вводить двумерную или трехмерную систему координат и следить за изменениями во времени двух или соответственно трех координат.

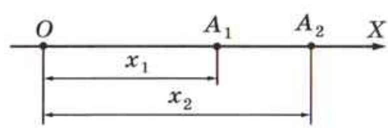


Рис. 3

Физика имеет дело с движениями реальных тел, а не абстрактных точек. Примерами

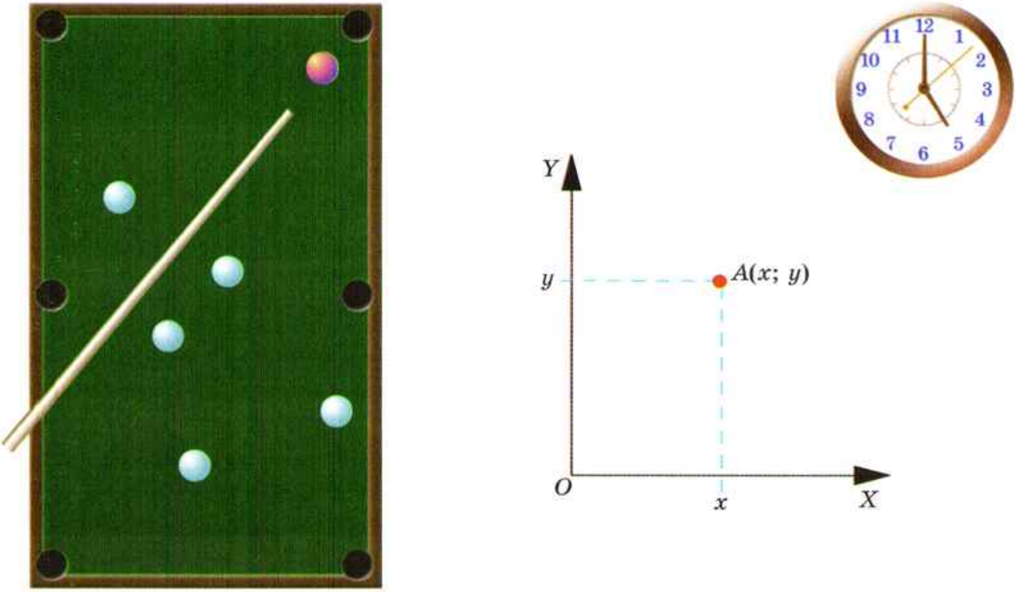


Рис. 4

одномерных прямолинейных движений тел являются движение автомобиля по прямому шоссе, железнодорожного состава по прямому полотну, вертикально взлетающей ракеты.

Примеры двумерных движений — смена положений трактора на ровном поле, шара по бильярдному столу (рис. 4), а трехмерных — полет птицы (рис. 5), бумажного голубя или слетающего с ветки сухого листа.

Для того, чтобы описать реальное механическое движение, надо знать, как изменяется с течением времени положение тела относительного выбранного тела отсчета. В физике это описание производится с использованием математического понятия *системы координат*. Начало системы координат совмещают с одной из точек тела отсчета, а направление и число осей выбирают так, чтобы математическое описание движения выглядело наиболее просто.

Большое значение имеет правильный выбор длины единичного координатного отрезка или масштаба измерения координат. Этой длиной может быть и основная единица длины — метр и другие единицы (миллиметр, сантиметр, километр, дюйм, фут и т. д.). Единичные отрезки по каждой из координатных осей могут быть разными.

Кроме системы координат, физике нужна также система учета времени. Она включает в себя выбор момента времени, начиная с которого

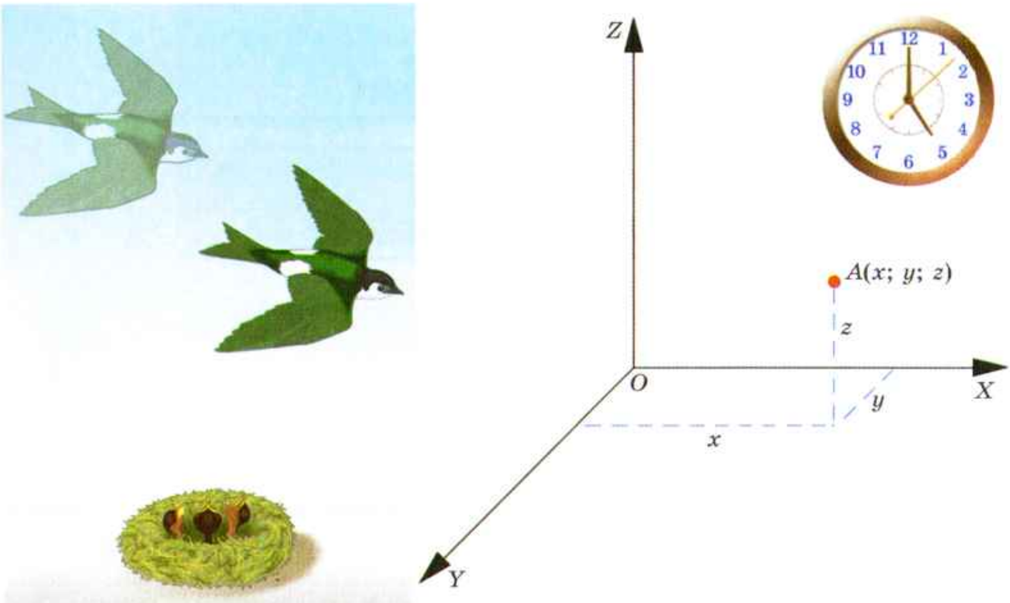


Рис. 5

рассматривается движение (этот момент называется начальным), и способа или инструмента измерения времени. Таким инструментом чаще всего являются часы, хотя о времени можно судить, например, и по числу дней или лет, прошедших с начального момента, и по положению Солнца на небе. О прошедшем времени судят иногда по количеству высыпавшегося песка (песочные часы) или вылившейся воды (водяные часы).

Тело отсчета, связанную с ним систему координат и систему отсчета времени физики объединяют в одно понятие и называют *системой отсчета.*

Относительность движения. Механическое движение относительно. Это значит, что одно и то же тело движется по-разному относительно разных тел отсчета, или даже может находиться в покое.

Рассмотрим такой пример. Допустим, что на движущейся платформе сидит человек и наблюдает за арбузом, неподвижно лежащем на платформе (рис. 6, *а*; стрелка указывает направление ее движения). В системе отсчета, связанной с платформой (или с человеком), арбуз находится в покое.

Если второй человек, сидящий у полотна железной дороги, свяжет систему отсчета с поверхностью Земли (рис. 6, *б*), то арбуз и первый человек относительно нее будут двигаться.

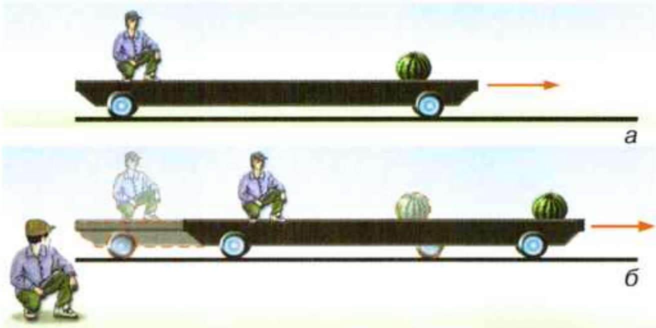


Рис. 6

Приведенный пример иллюстрирует относительность движения и покоя: одно и то же тело (арбуз) в системе отсчета, связанной с Землей, движется, а в системе отсчета, связанной с платформой, покоится.

Без указания тела отсчета нельзя говорить о том, движется тело или нет.

С выбором тела отсчета связаны первые в истории естествознания системы мира: *геоцентрическая* и *гелиоцентрическая*. Системой мира называются представления о взаимном расположении и движении небесных тел.

Геоцентрическая система мира была разработана древнегреческими учеными **Аристотелем** (IV в. до н. э.) и **Птолемеем** (II в. до н. э.). В этой системе в центре мира расположена Земля. Она неподвижна, поскольку выбирается за тело отсчета. Вокруг Земли обращаются все остальные тела (рис. 7, *а*). С помощью этих представлений Птолемею удалось не только объяснить движение небесных тел, но и с большой точностью предсказывать положения планет, Солнца и Луны относительно Земли в разные моменты времени.

Геоцентрическая система мира принималась за истинную в течение почти 2000 лет.

Коперник Николай (1473—1543) — польский астроном, создатель гелиоцентрической системы мира. Свое учение Н. Коперник изложил в сочинении «Об обращениях небесных сфер» (1543), запрещенном католической церковью с 1616 по 1828 год.

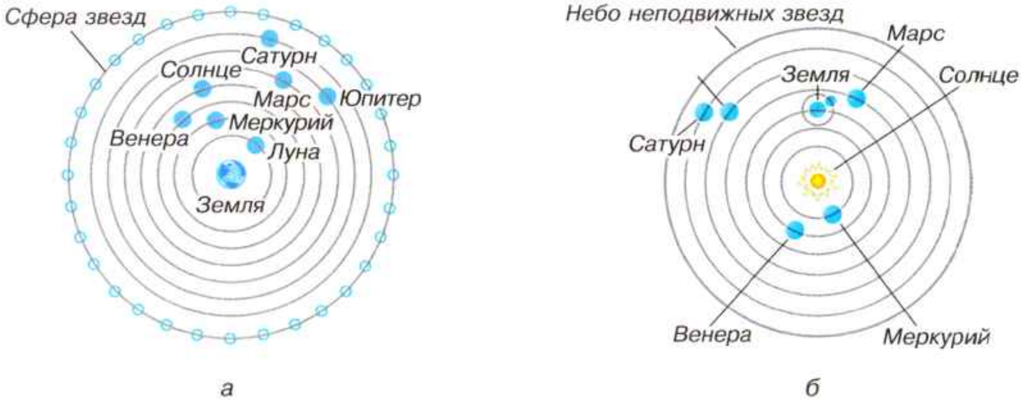


Рис. 7

Новая система мира — гелиоцентрическая — была предложена Н. Коперником в XVI в. В качестве тела отсчета он использовал не Землю, а Солнце. С помощью измерений и расчетов Коперник доказал, что при таком выборе места наблюдения видимый характер движения планет значительно упрощается: все они, включая и Землю, обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам (рис. 7, *б*)[1]. Исключение составляет только Луна, являющаяся спутником Земли.

Таким образом, смена выбора тела отсчета изменила представления человечества об устройстве Вселенной. Правда, находясь на Земле, мы наблюдаем круговое движение только Солнца и Луны. Да и вообще, система мира Птолемея остается вполне допустимой и сейчас (ведь выбор тела отсчета, как правило, производится по соображениям удобства описания движения). Более того, при расчетах полетов космических кораблей, направляемых к Луне, Марсу и другим планетам, используется именно геоцентрическая система мира.

Как изучают движение. Исследование любого явления начинается с наблюдения его в естественной обстановке. Допустим, мы хотим изучить движение падающих тел. Прежде всего надо увидеть такое движение. Но этого недостаточно. В самом деле, сколько раз вы видели падение тел, но вряд ли сможете исчерпывающе ответить на совсем, казалось бы, простые вопросы: «Почему тела падают на Землю? Как они при этом движутся? Почему два различных тела за каждую секунду падения проходят одинаковые расстояния?»

Чтобы ответить на эти и подобные им вопросы, недостаточно только наблюдать за естественным падением тел. Необходимо многократно изучать

[1] Позже немецкий ученый И. Кеплер с помощью более точных измерений установил, что планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам.

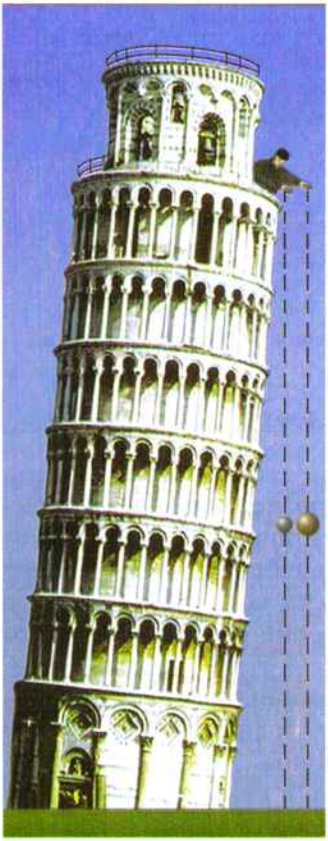


Рис. 8

его в ходе специальных опытов для выявления присущих ему особенностей, которые не сразу бросаются в глаза.

Вот как, например, изучал закономерности падения тел Г. Галилей. Согласно устным преданиям, он ронял со знаменитой наклонной Пизанской башни (Италия) одновременно чугунные и каменные шары (рис. 8) и обнаружил, что они достигали основания башни в одно и то же время. Галилей предположил (выдвинул гипотезу), что легкое птичье перо упало бы с башни одновременно с тяжелыми шарами, если бы не было сопротивления воздуха.

Каждая научная гипотеза должна быть проверена экспериментально, путем постановки специальных опытов. Возможность экспериментальной проверки гипотезы Галилея появилась только после изобретения воздушного насоса. Выполним такой опыт. В длинную толстостенную стеклянную трубку поместим свинцовый шарик, кусок пробки и птичье перо. Быстро перевернув трубку, мы увидим, что свинцовый шарик упадет на дно трубки гораздо быстрее пробки и птичьего пера (рис. 9, *а*). Так падают тела, когда в трубке есть воздух. С помощью насоса откачаем из трубки воздух (рис. 9, *б*), закроем кран и опять перевернем трубку. Теперь мы видим, что в безвоздушном пространстве (вакууме) свинцовый шарик, кусок пробки и птичье перо падают одновременно (рис. 9, *в*). Таким образом, опыт подтвердил гипотезу Галилея.

Позже Ньютон разработал теорию, которая объяснила, почему и как падают тела на землю, а также многие другие механические явления. Она не потеряла своего значения и в наше время: классическая механика используется для расчетов, связанных с движением поездов, самолетов, искусственных спутников Земли, с запуском космических кораблей, строительством зданий и др.

Таким образом, можно сказать, что изучение физического явления должно включать следующие этапы:

— наблюдение явления в естественных условиях;

— выдвижение предположения, гипотезы для объяснения явления;

— многократную экспериментальную проверку гипотезы как в естественных, так и в специально созданных (лабораторных) условиях;

— анализ результатов эксперимента, который либо подтверждает выдвинутую гипотезу (тогда она становится базой для создания теории или входит составной частью в уже существующую теорию), либо делает необходимым выдвижение новой гипотезы;

— объяснение на основе созданной теории не только уже известных явлений и закономерностей, но и предсказание новых явлений и новых закономерностей.

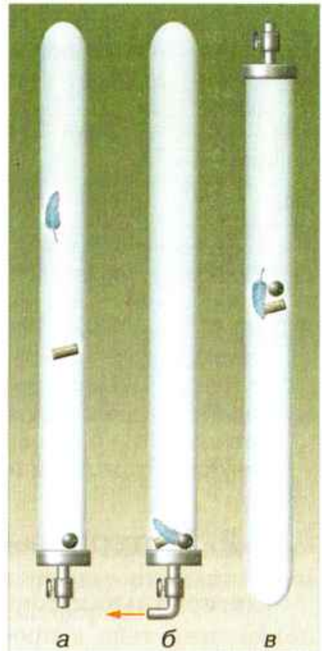


Рис. 9

Проверьте себя

1. Что изучает кинематика?
2. Какое движение называют механическим?
3. Что такое система отсчета?
4. Книга лежит на столе. Укажите тело отсчета, относительно которого книга: а) покоится; б) движется.
5. Относительно какого тела определяются положения тел в геоцентрической системе мира? В гелиоцентрической?
6. Назовите основные этапы изучения физических явлений.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Мысль о том, что покой и движение относительны, возникла еще в давние времена.

- Древнеримский поэт Вергилий в поэме «Энеида» писал: «В море из порта идем и отходят и земли, и грады».
- Китайский астроном Лося Хун, живший во II—I вв. до н. э., считая, что Земля движется, так обосновывал свое предположение: «Земля постоянно движется, но люди этого не знают, они, как команда на закрытом судне, когда оно перемещается, этого не замечают».
- Идея относительности движения не была чужда испанскому писателю С. Сервантесу — автору «Дон Кихота», жившему в одно время с Галилеем. Ею проникнута одна из забавных сцен произведения — описание путешествия прославленного рыцаря и его оруженосца на деревянном коне.

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

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

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

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

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

- А Гекльберри Финн — герой произведения американского писателя М. Твена «Приключения Гекльберри Финна» (1884) так описывал ощущения, испытываемые им во время плавания на плоту в тумане:

«Я сидел тихо, насторожив уши. Меня, разумеется, уносило вниз по течению со скоростью четыре-пять миль в час, но этого обыкновенно не замечаешь, — напротив, кажется, будто лодка стоит на воде неподвижно; а если мелькнет мимо коряга, то даже дух захватывает, думаешь: вот здорово летит коряга! А что сам летишь, это и в голову не приходит. Если вы думаете, что ночью на реке, в тумане ничуть не страшно и не одиноко, попробуйте сами хоть разок, тогда узнаете».

§ 2. Материальная точка. Поступательное движение тел

Материальная точка. Чтобы изучить движение тела, т. е. изменение положения тела в пространстве с течением времени, нужно прежде всего уметь определять само это положение. Но каждое тело имеет определенные размеры, и, следовательно, разные точки тела находятся в разных местах пространства. Как же определять положение тела? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим следующие примеры. Самолет движется по взлетной полосе, тот же самолет летит на большой высоте над поверхностью Земли; за космическим кораблем наблюдает космонавт, осуществляющий с ним стыковку, за тем же кораблем следят из Центра управления полетом на Земле. Очевидно, что при движении самолета по взлетной полосе и при осуществлении стыковки размеры тел следует учитывать, а при наблюдении далеких объектов размеры тел не имеют значения.

В тех случаях, когда тела малы по сравнению с расстояниями до них, их размеры, как правило, можно не учитывать, т. е. считать тела точками.

Тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь, называют *материальной точкой.*

Таким образом, мы заменяем реальное тело его моделью — материальной точкой[1].

Так как расстояние от Земли до Солнца во много раз (примерно в 25 000 раз) превосходит земной радиус, то при изучении движения Земли

---

[1] Понятия *точки* в математике и *материальной точки* в физике различаются. Материальная точка в физике может наделяться свойствами тела, моделью которого она является, например массой, зарядом и др.

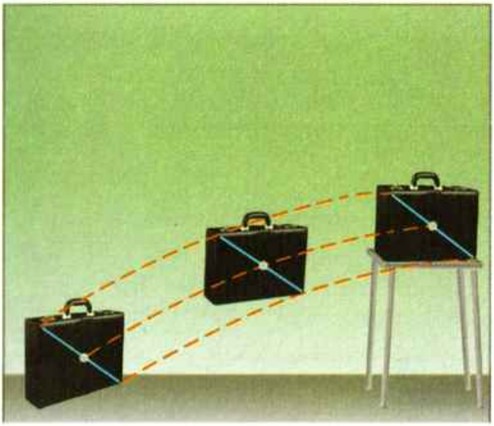


Рис. 10

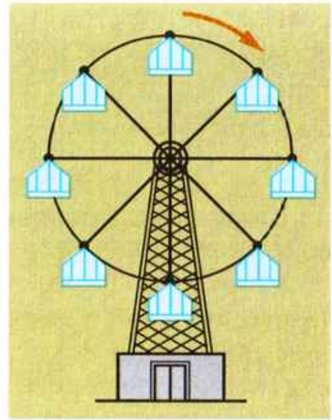


Рис. 11

вокруг Солнца ее можно считать материальной точкой. Однако электропоезд, проезжающий мимо платформы, нельзя заменить материальной точкой, так как длина поезда сопоставима с длиной платформы.

Поступательное движение. Не нужно описывать движение каждой точки тела и тогда, когда все его точки движутся одинаково. Например, одинаково движутся все точки чемодана, который переставляют за ручку с пола на подставку (рис. 10), кабины колеса обозрения (рис. 11), лыжника, прыгающего с трамплина (рис. 12).

Движение, при котором все точки тела движутся одинаково, называют *поступательным*.

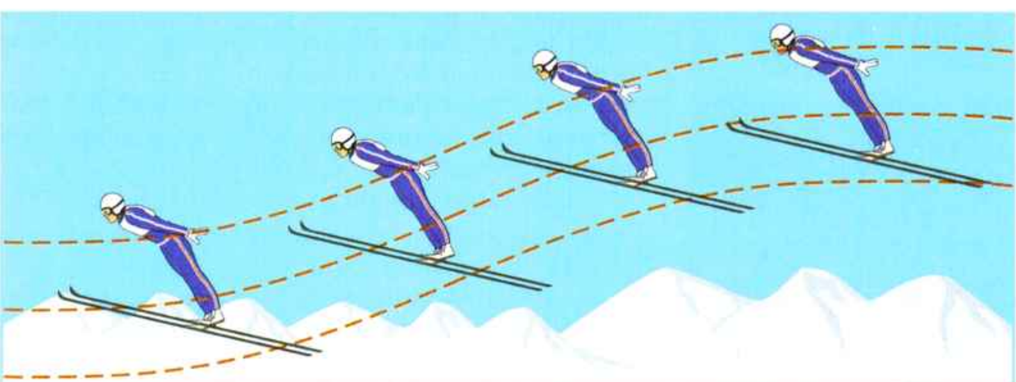


Рис. 12

При таком движении любая прямая, мысленно проведенная в теле, остается параллельной самой себе (см. рис. 10).

Если мы знаем, как движется какая-нибудь одна точка поступательно движущегося тела, то мы можем сказать, как движутся все остальные точки.

Траектория движения. Заменив тело материальной точкой, легко определить траекторию его движения.

Траекторией называют множество точек, через которые последовательно проходит тело за время движения.

Траектории движения тел, как правило, невидимы. Исключений немного: лыжня в поле или в лесу, следы капель дождя на оконном стекле. Иногда видимую траекторию своего движения в небе оставляет самолет (рис. 13). О траекториях автомашин, проезжающих по мокрой асфальтированной или грунтовой дороге, освещаемой фарами, можно судить по оставленным следам.

В этих примерах размеры тел значительно меньше пройденных расстояний, поэтому и самолет, и автомобиль можно принять за материальные точки.

Траектория может быть известна еще до начала движения тела. Так, полотно железной дороги определяет траекторию движения поездов. Иногда траекторию можно найти, исходя из других данных о движении тела. Например, траекторию движения спутников связи или траекторию движения транспортного корабля к космической станции рассчитывают заранее. Возможные виды траекторий полета космического корабля Земля — Марс и обратно показаны на рисунке 14.

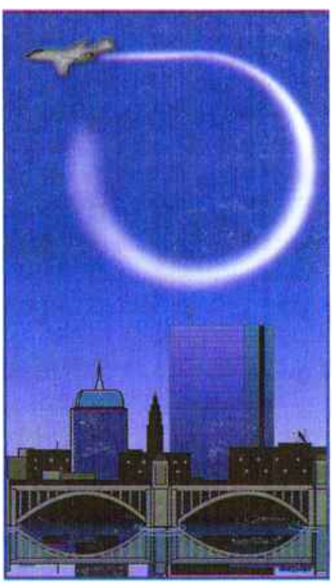


Рис. 13

По форме траектории движения разделяют на *прямолинейные* (например, падение шаров с башни в опыте Галилея) и *криволинейные* (например, движение самолета, описывающего мертвую петлю).

Форма траектории движения одного и того же тела различна относительно разных систем отсчета. Например, для человека, неподвижного относительно движущейся платформы (рис. 15, *а*, где стрелкой показано направление движения платформы), падающий мяч движется по прямой вертикально вниз, а для наблюдателя, находящегося у железнодорожного полотна

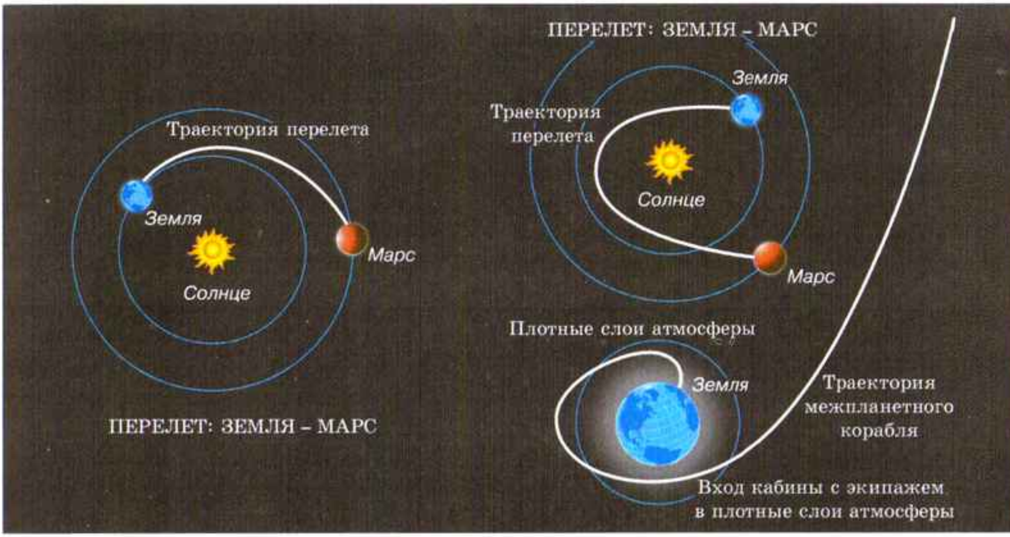
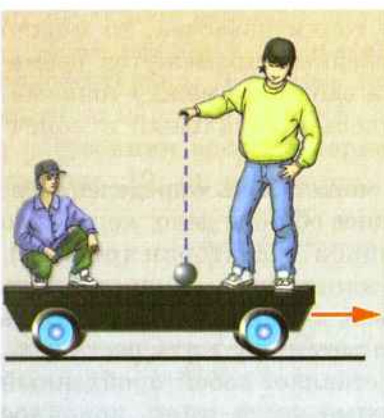


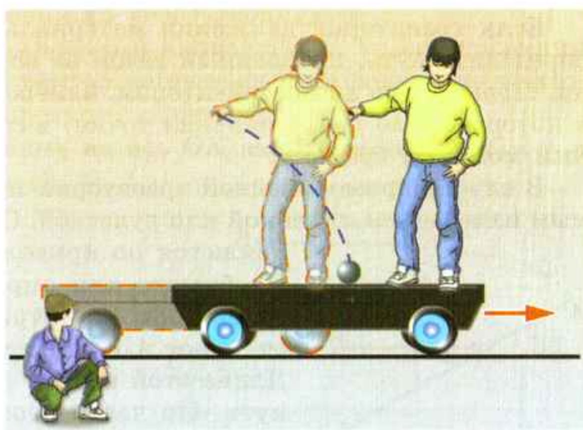
Рис. 14

(рис. 15, *б*), мяч не только падает вниз, но и перемещается вместе с платформой, т. е. движется по кривой.

В геоцентрической системе мира (относительно Земли) видимое движение планет, например Марса, происходит по петлеобразной линии (на рис. 16 показан путь Марса среди звезд за промежуток времени от 1 сентября 1988 года до 1 мая 1989 года). В гелиоцентрической системе мира (относительно Солнца) Марс движется по эллипсу (рис. 17).



а



б

Рис. 15

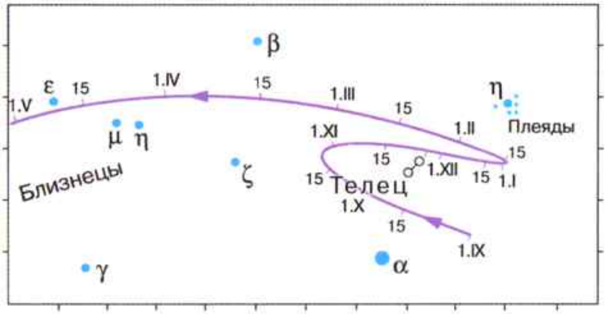


Рис. 16

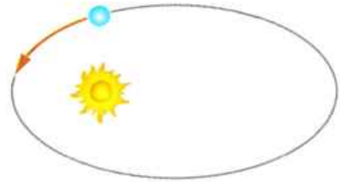


Рис. 17

Проверьте себя

1. Материальная точка — это физическая модель. Каким свойством тела пренебрегают, когда пользуются этой моделью?
2. В каких случаях тело можно рассматривать как материальную точку? Приведите примеры.
3. Самолет совершает рейс по маршруту Москва — Владивосток. Может ли в этом случае диспетчер рассматривать самолет как материальную точку?
4. Что называется траекторией движения?
5. Зависит ли форма траектории от выбора системы отсчета?
6. Приведите примеры видимых траекторий движения тел.

§ 3. Путь и перемещение

Если траектория движения материальной точки известна, то можно определить путь, пройденный телом за определенный промежуток времени. *Путь* — это длина траектории, измеренная вдоль нее между точками, в которых тело (материальная точка) находилось в начальный и конечный моменты времени.

В случае прямолинейной траектории путь может быть определен прямым измерением линейкой или рулеткой. Сложнее обстоит дело, когда тело движется по криволинейной траектории (рис. 18). На бумаге для определения пути следует вдоль траектории (по штриховой линии) проложить нить от точки A к точке B, а затем эту нить растянуть. Длина этой нити и представляет собой пройденный путь. Но часто необходимо знать лишь конечное положение тела. Для его определения используют физическую величину — перемещение.

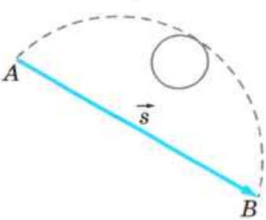


Рис. 18

Перемещением точки называют направленный отрезок прямой, соединяющий начальное и конечное положения материальной точки.

Соединив точки A и B прямым отрезком (см. рис. 18) и снабдив его конец стрелкой, мы получим перемещение тела. Длиной этого отрезка, т. е. расстоянием между точками A и B, определяется числовое значение перемещения.

Таким образом, перемещение одновременно указывает и направление движения и расстояние между начальным и конечным положениями тела.

Величины, которые характеризуются направлением и числовым значением (модулем), называют *векторными*. С одной из таких векторных величин — силой — вы познакомились в 7-м классе.

Перемещение обозначают буквой $\vec{s}$. Стрелка над буквой указывает, что перемещение — векторная величина. Буква s без стрелки означает *модуль* вектора перемещения. Модуль перемещения — это *скалярная* величина, причем она может быть только положительным числом или быть равна нулю.

Перемещение тела надо отличать от пройденного пути. Вернемся к рисунку 18. Из него видно, что путь (длина траектории) больше модуля перемещения (длины вектора $\vec{s}$). Если же тело из точки B вернется в точку A по той же траектории или какой-то другой, то путь будет равен суммарной длине траекторий, а модуль перемещения будет равен нулю.

На рисунке 19, *а*, *б* изображены координатная ось OX и два вектора перемещения. Они параллельны оси OX.

Длину вектора перемещения, взятую со знаком «+» или «−», называют *проекцией вектора перемещения на координатную ось*.

Если вектор и ось имеют одинаковые направления, то его проекция положительна. В случае, когда вектор направлен в сторону, противоположную направлению оси, его проекция отрицательна.

Проекция вектора перемещения на ось OX записывается так: $s_x = s$ (см. рис. 19, *а*); $s_x = -s$ (см. рис. 19, *б*).

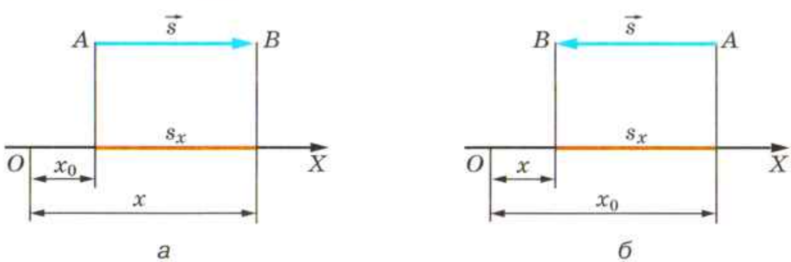


Рис. 19

Если точка A — начальное положение тела, определяемое координатой x_0, а точка B — его конечное положение, определяемое координатой x, то для случая, представленного рисунком 19, *а*, можно записать: $x = x_0 + s$, а для случая, представленного рисунком 19, *б*, $x = x_0 - s$, или в общем случае:

$$\boxed{x = x_0 + s_x.} \tag{1}$$

Следовательно, по известному вектору перемещения тела и его начальной координате можно определить его конечную координату, т. е. найти положение тела относительно выбранной системы отсчета в любой момент времени.

Совместив начало отсчета координаты с начальным положением точки ($x_0 = 0$), уравнение (1) можно записать в более простом виде:

$$\boxed{x = s_x.} \tag{2}$$

Проверьте себя

1. Какую физическую величину называют перемещением?
2. Есть ли разница между пройденным путем и перемещением?
3. Приведите примеры движений, когда модуль перемещения тела равен нулю, а пройденный путь отличен от нуля.
4. Автомобиль дважды проехал вокруг Москвы по кольцевой дороге, длина которой 111 км. Чему равны пройденный автомобилем путь и его перемещение?
5. Что оплачивается при проезде в такси: путь или длина перемещения?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 1

1. Кинематика изучает, как движется тело, без рассмотрения причин движения.
2. Простейшее движение — механическое движение. Механическим движением называют изменение с течением времени положения тела в пространстве относительно других тел.
3. Механическое движение относительно. Относителен и покой. Тело может находиться в покое относительно одной системы отсчета и двигаться относительно другой.
4. Для описания механического движения введен ряд понятий (материальная точка, траектория, система отсчета) и величин (путь, перемещение).

5. Системой отсчета называют тело отсчета, связанную с ним систему координат и систему отсчета времени.
6. Материальной точкой называют тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.
7. Непрерывную линию, которую описывает тело (рассматриваемое как материальная точка) по отношению к выбранной системе отсчета, называют траекторией. Форма траектории движения зависит от выбора системы отсчета.
8. Путь — это длина линии, измеренная вдоль траектории между точками, в которых тело (материальная точка) находилось в начальный и конечный моменты времени.
9. Перемещением называют направленный отрезок прямой (вектор), соединяющий начальное и конечное положения материальной точки.

глава 2

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Изучение механического движения мы начнем с наиболее простого его вида — с движения, происходящего вдоль прямой линии, а из всего многообразия прямолинейных движений выберем равномерное движение.

Равномерным движением называют такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Если, например, по прямолинейному участку дороги автомобиль двигался так, что

за каждый час проезжал 60 км,
за каждые полчаса (30 минут) — 30 км,
за каждые четверть часа (15 минут) — 15 км,
за каждые 10 минут — 10 км,
за каждые 5 минут — 5 км,
за каждую минуту — 1 км,
за каждые полминуты (30 секунд) — 0,5 км и т. д.,

то это значит, что автомобиль на этом участке двигался равномерно.

§ 4. Скорость равномерного движения

Определение скорости. В главе 1 мы познакомились с некоторыми понятиями (траектория, система отсчета, материальная точка) и физическими величинами (путь, перемещение), которые были введены для описания движения тела. Однако они не характеризуют движения исчерпывающе.

Рассмотрим пример. Допустим, что в город *B* по одному и тому же шоссе движутся автомобилист, мотоциклист, велосипедист и бегун (рис. 20).

Рис. 20

В городе A они стартовали одновременно. Очевидно, что в город B они прибудут в разное время: раньше всех автомобилист, а позже всех — бегун. Все четверо двигались по одинаковым траекториям, прошли и проехали одинаковые расстояния, одинаковы и их перемещения. Однако их движения различны: они отличаются быстротой. Быстроту движения характеризует физическая величина — скорость.

Скоростью равномерного прямолинейного движения называют величину, равную отношению перемещения тела за любой промежуток времени к этому промежутку.

Обозначив скорость буквой v, можно записать

$$\boxed{\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}.} \qquad (1)$$

Скорость, как и перемещение, векторная величина. Направление скорости совпадает с направлением перемещения.

Формулу (1) можно написать для проекций на координатную ось, совпадающую с траекторией движения:

$$\boxed{v_x = \frac{s_x}{t},} \qquad (2)$$

а также для модулей входящих в нее величин:

$$\boxed{v = \frac{s}{t}.} \qquad (3)$$

Понятие о системе единиц. Единицы скорости. Для физических величин установлены специальные единицы, совокупность которых образует систему единиц. В большинстве стран мира принята Международная система единиц — сокращенно СИ (Система Интернациональная). Она построена на основе нескольких физических величин, называемых основными, к числу которых относятся длина и время. Для единиц этих величин установлены специальные эталоны.

За единицу длины в Международной системе единиц принят м е т р. Одним из международных эталонов (образцов) метра является брусок, изготовленный из сплава платины с иридием, на котором нанесены два штриха. Расстояние между этими штрихами равно 1 м.

Эталоном единицы времени может служить продолжительность такого повторяющегося процесса, как движение Земли вокруг Солнца. За единицу времени в СИ принята с е к у н д а. Секунда примерно равна $\frac{1}{86\,400}$ части солнечных суток.

В настоящее время приняты более точные определения метра и секунды, с которыми вы познакомитесь в старших классах.

От основных единиц образуются производные единицы. Для этого используются соотношения в виде формул между физическими величинами.

Установим единицу скорости. Из формулы (3) видно, что если за 1 с тело совершает перемещение, модуль которого равен 1 м, то модуль скорости тела окажется равным единице $\left(1\,\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$. Скорость такого движения принята за единицу скорости в Международной системе единиц.

Метр в секунду равен такой скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за 1 с перемещается на расстояние, равное 1 м.

Вы знаете, что расстояние можно выражать не только в метрах, но и в сантиметрах и километрах, а время — в часах. Поэтому применяются, кроме единицы скорости 1 м/с, и другие единицы: километр в час (км/ч), сантиметр в секунду (см/с). Между этими единицами существует следующая связь:

$$1\,\frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{1000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = \frac{10}{36}\,\frac{\text{м}}{\text{с}};\ 1\,\frac{\text{см}}{\text{с}} = \frac{0{,}01\ \text{м}}{\text{с}} = 0{,}01\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Равномерное движение — движение с постоянной скоростью. Вернемся к примеру, с которого мы начали изучение равномерного движения, и подсчитаем скорости движения на каждом из выделенных нами участков:

$$v_1 = \frac{80\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};\ v_2 = \frac{40\ \text{км}}{\frac{1}{2}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};$$

$$v_3 = \frac{20\ \text{км}}{\frac{1}{4}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};\ v_4 = \frac{10\ \text{км}}{\frac{1}{8}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};$$

$$v_5 = \frac{5\ \text{км}}{\frac{1}{16}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};\ v_6 = \frac{2{,}5\ \text{км}}{\frac{1}{32}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}};$$

$$v_7 = \frac{1{,}25\ \text{км}}{\frac{1}{64}\ \text{ч}} = 80\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}\ \text{и т. д.}$$

Мы видим, что скорость имеет одно и то же значение. Следовательно, можно сделать такой вывод:

равномерное прямолинейное движение — это движение с постоянной скоростью (модуль вектора скорости и его направление с течением времени не изменяются).

Приборы для измерения скорости. Для измерения скорости созданы специальные приборы. Наиболее распространенный из них — спидометр (рис. 21), устанавливаемый на автомобилях, и указатель скорости, устанавливаемый на самолетах. Сотрудники Государственной инспекции безопасности дорожного движения имеют специальные приборы, которые позволяют определить скорость движения любого движущегося объекта с неподвижной или движущейся патрульной машины.

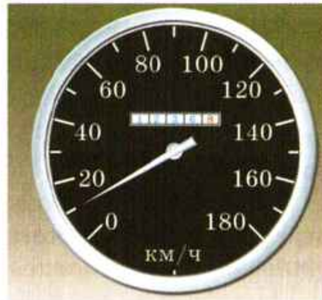


Рис. 21

* **Относительность скорости**[1]. Допустим, что мальчик перешел с кормы на нос лодки, плывущей по реке, совершив перемещение $\vec{s}_1$ (рис. 22, *а*). Наблюдатель, находящийся в той же лодке, определит, что скорость движения мальчика относительно лодки равна $\upsilon_1 = \frac{s_1}{t}$, где t — время движения мальчика.

а

б

Рис. 22

[1] Материал, отмеченный в учебнике звездочкой (*), предназначен для дополнительного чтения.

Наблюдатель же, находящийся на берегу, заметит, что мальчик прошел вдоль лодки расстояние s_1, но за промежуток времени t сама лодка сместилась по реке, и общее перемещение мальчика относительно берега равно $\vec{s}_2$ (рис. 22, *б*), а его скорость $v_2 = \frac{s_2}{t}$. Так как $s_2 > s_1$ (см. рис. 22), то $v_2 > v_1$.

Этот пример показывает, что скорость (как и траектория) зависит от выбора системы отсчета. Иными словами, скорость движения — *величина относительная, зависящая от выбора системы отсчета.**

Проверьте себя

1. Дайте определение скорости равномерного прямолинейного движения. Какой величиной является скорость — векторной или скалярной?
2. Какие единицы скорости вы знаете?
3. Сравните следующие значения скорости: 72 км/ч, 30 м/с и 10 см/с.
4. Автомобиль движется по прямолинейному участку дороги. Стрелка спидометра некоторое время не отклоняется от отметки 60 км/ч. Как движется автомобиль в течение этого промежутка времени?
5. Автомобиль движется из города A в город B со скоростью 50 км/ч. Другой автомобиль движется из города B в город A тоже со скоростью 50 км/ч. Можно ли сказать, что оба автомобиля движутся с одинаковыми скоростями?
6. Тело движется поступательно. Одна из его точек имеет скорость 1 м/с. Какова скорость движения других точек тела?

§ 5. Перемещение при прямолинейном равномерном движении

Из формулы скорости (см. § 4) следует, что перемещение тела при равномерном прямолинейном движении пропорционально времени движения:

$$\boxed{\vec{s} = \vec{v}t,} \qquad (1)$$

или в проекциях на горизонтальную ось, совпадающую с направлением движения,

$$\boxed{s_x = v_x t.} \qquad (2)$$

Но мы уже знаем, что между проекцией перемещения s_x и координатами движущейся точки в начальный и конечный моменты времени существует связь:

$$s_x = x - x_0.$$

Поэтому можно записать, что

$$x - x_0 = v_x t,$$

откуда

$$\boxed{x = x_0 + v_x t.} \qquad (3)$$

Это выражение называется *уравнением движения* материальной точки, движущейся равномерно и прямолинейно.

С его помощью можно определить положение движущегося тела (его координаты) в любой момент времени, если известны его начальное положение (начальная координата) и скорость движения.

Если $x_0 = 0$, то уравнение (3) упрощается и принимает вид:

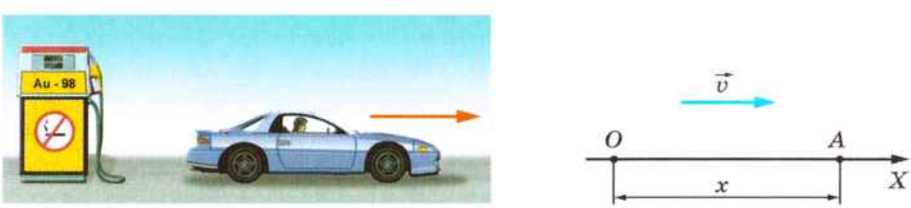
$$x = v_x t. \qquad (4)$$

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Автомобиль движется равномерно со скоростью 20 м/с по прямолинейному участку дороги мимо заправочной станции (рис. 23, *а*). Определите положение автомобиля через 30 с после его проезда мимо станции.

Решение. За тело отсчета и за начало отсчета координат O примем заправочную станцию. Ось OX направим в сторону движения автомобиля (рис. 23, *б*). Время будем отсчитывать от момента, когда автомобиль поравнялся с заправочной станцией. Тогда в начальный момент времени начальная координата равна нулю ($x_0 = 0$) и для нахождения координаты автомобиля в момент времени t можно применить формулу (4): $x = v_x t$. Так как вектор скорости автомобиля $\vec{v}$ и ось OX имеют одинаковые направления, то проекция скорости положительна: $v_x = v = 20$ м/с; $t = 30$ с. Следовательно, $x = 20\ \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 30\ \text{с} = 600$ м.

Ответ: положение автомобиля относительно заправочной станции определяется координатой $x = 600$ м.



а *б*

Рис. 23

*2. По прямолинейной дороге навстречу друг другу равномерно движутся два автомобиля: один — со скоростью 90 км/ч, другой — со скоростью 72 км/ч. Автомобили встретились у заправочной станции и, не останавливаясь, продолжили свое движение (рис. 24, *а*). Определите положение автомобилей относительно заправочной станции через 30 мин после встречи.

Решение. За тело отсчета и за начало отсчета координат O примем заправочную станцию, время будем отсчитывать от момента встречи автомобилей. Координатную ось OX направим по направлению движения первого автомобиля (рис. 24, *б*). Тогда координаты автомобилей через 0,5 ч после встречи можно вычислить по формулам:

$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t,$$
$$x_2 = x_{02} + v_{2x}t.$$

Начальные координаты x_{01} и x_{02} у обоих автомобилей равны нулю. Поэтому $x_1 = v_{1x}t$ и $x_2 = v_{2x}t$.

Проекция v_{1x} скорости первого автомобиля положительна, так как вектор его скорости направлен так же, как ось OX: $v_{1x} = v_1 = 90$ км/ч.

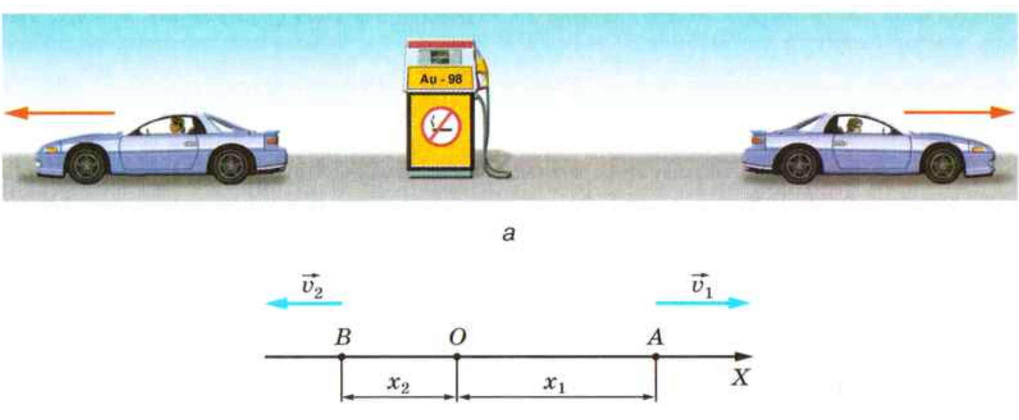
Проекция v_{2x} скорости второго автомобиля отрицательна, потому что вектор его скорости направлен противоположно оси OX: $v_{2x} = -v_2 = -72$ км/ч.

Следовательно,

$$x_1 = 90\,\frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = 45\ \text{км};$$

$$x_2 = -72\,\frac{\text{км}}{\text{ч}} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = -36\ \text{км}.$$

Ответ: положение первого автомобиля относительно заправочной станции определяется координатой $x_1 = 45$ км, а второго — координатой $x_2 = -36$ км.*



а

б

Рис. 24

Проверьте себя

1. Как выразить перемещение тела через скорость его движения и время?
*2. Как выразить перемещение тела через его координаты?
*3. Запишите уравнение движения материальной точки. Объясните, что обозначают все буквы, входящие в эту формулу.
4. Две моторные лодки движутся вдоль берега озера навстречу друг другу. Скорость каждой лодки равна 3 м/с. Через какое время после встречи расстояние между лодками станет равным 120 м?
*5. Как изменится ответ на вопрос 4, если те же лодки будут двигаться по реке: одна по течению, а другая — против течения?

§ 6. Графическое представление движения

Во многих случаях движение тел, например железнодорожных поездов, удобно описывать с помощью графиков. Такой способ описания движения весьма нагляден. Познакомимся с графическим способом представления прямолинейного равномерного движения.

График координаты. Формула $x = x_0 + v_x t$ показывает, что координата материальной точки, движущейся равномерно и прямолинейно, изменяется с течением времени. Эту зависимость можно представить в виде графика.

Сначала рассмотрим простой случай, когда начальное положение точки совпадает с началом оси OX, тогда $x_0 = 0$ и $x = v_x t$. Следовательно, между координатой и временем существует прямая пропорциональная зависимость, так как $v_x = \text{const}$. Графиком этой зависимости, как вы знаете, является прямая линия.

Построим, например, график движения пешехода, если он движется со скоростью 4 км/ч в положительном направлении оси OX ($v_x = v = 4$ км/ч). Задавая моменты времени ($t_1 = 1$ ч, $t_2 = 2$ ч, $t_3 = 3$ ч и т. д.), по формуле $x = v_x t$ будем находить соответствующие координаты: $x_1 = 4$ км, $x_2 = 8$ км, $x_3 = 12$ км и т. д.

Теперь построим на плоскости систему координат, по горизонтальной оси которой будем откладывать в определенном масштабе интервалы времени t, а по вертикальной оси тоже в определенном масштабе — координаты x (рис. 25). Соединив построенные точки A, B, C, мы увидим, что полученный график представляет собой прямую, проходящую через начало нашей системы координат (см. рис. 25). Эта прямая называется *графиком движения*.

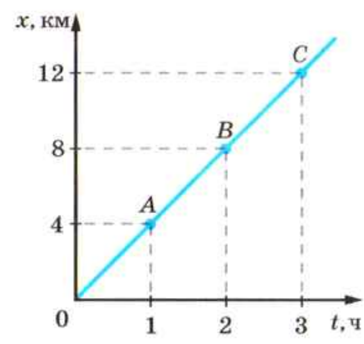


Рис. 25

* Теперь будем считать, что в момент начала наблюдения пешеход находился на

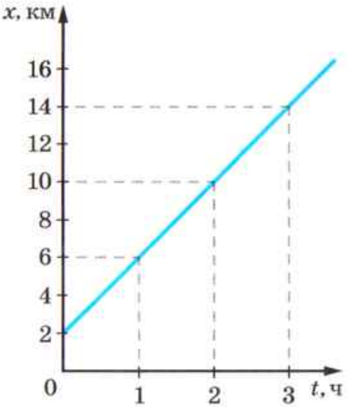


Рис. 26

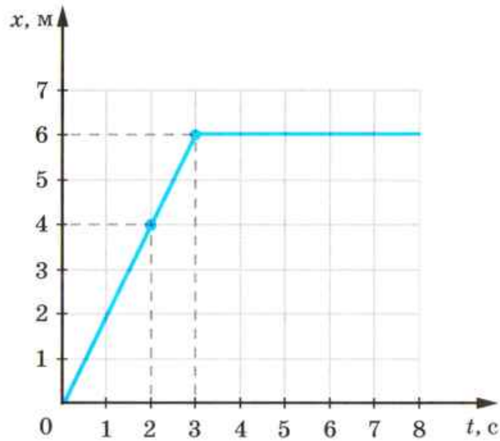


Рис. 27

расстоянии 2 км от начала оси OX в положительном направлении этой оси, т. е. его начальная координата $x_0 = 2$ км. Тогда для определения координат, соответствующих тем же моментам времени, мы должны применить формулу $x = x_0 + v_x t$ (здесь $x_0 = 2$ км, $v_x = v = 4$ км/ч).

Выполнив вычисления, мы получим: $x_1 = 6$ км, $x_2 = 10$ км, $x_3 = 14$ км и т. д.

По этим данным, как и в случае, когда $x_0 = 0$, построим график зависимости координаты от времени (рис. 26). Мы видим, что и в этом случае график движения представляет собой отрезок прямой линии. Однако этот отрезок не проходит через начало координат.*

График движения не следует путать с траекторией движения, которой в нашем случае является тоже прямая линия. Она совпадает с осью OX.

График движения дает такое же полное описание движения, как и формула (3), выведенная в § 5. Например, пусть нам известен график равномерного движения тела (рис. 27). С помощью этого графика мы можем получить следующие сведения о движении тела.

В начальный момент времени $t_0 = 0$ тело имело координату $x_0 = 0$, а в момент времени $t_1 = 2$ с тело находилось на оси OX в точке с координатой $x_1 = 4$ м. Начиная с момента времени $t_2 = 3$ с, координата имеет одно и то же значение, равное $x_2 = 6$ м. Это означает, что тело остановилось.

По виду графиков движения можно судить не только о координате тела, но и о его скорости. Если $x_0 = 0$, то $x = v_x t$. При движении в положительном направлении оси OX $v_x = v$, поэтому $v = \frac{x}{t}$. Для нашего примера мы получим, что

$$v = \frac{x_1}{t_1} = \frac{4\ \text{м}}{2\ \text{с}} = 2\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

График скорости. Наряду с графиками движения часто пользуются графиками скорости. Для построения графика скорости применяют прямоугольную систему координат, по горизонтальной оси которой откладывают в определенном масштабе время, а по вертикальной — модуль скорости или проекцию скорости.

В том случае, когда движение происходит в сторону, совпадающую с направлением оси OX, проекция скорости на эту ось положительна и равна модулю скорости ($v_x = v$). Если движение происходит в направлении, противоположном направлению оси OX, то проекция скорости отрицательна ($v_x = -v$). Поэтому графиком, выражающим зависимость проекции скорости от времени, может быть либо прямая *1*, либо прямая *2* (рис. 28). Обе прямые параллельны оси времени, так как в случае равномерного прямолинейного движения скорость со временем не изменяется (v = const).

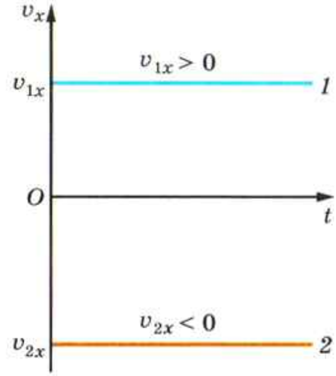


Рис. 28

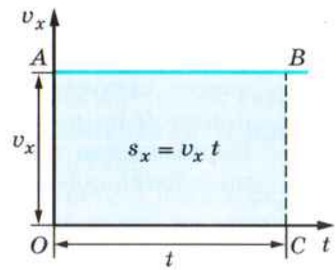


Рис. 29

На рисунке 29 изображен график зависимости проекции скорости от времени в случае, когда $v_x > 0$. С помощью этого графика можно определить проекцию перемещения, совершенного телом за время t. Она равна площади прямоугольника $OABC$, в котором сторона OA есть проекция скорости, а сторона OC — время движения t. Так как площадь прямоугольника равна произведению его сторон, то $s_x = v_x t$.

Проверьте себя

1. Что представляет собой график движения равномерно и прямолинейно движущейся материальной точки?
2. Можно ли по графику, выражающему зависимость координаты от времени для материальной точки, движущейся равномерно и прямолинейно, определить скорость движения?
3. Что представляет собой график скорости движения материальной точки, движущейся равномерно и прямолинейно?
4. В каком случае график скорости расположен ниже оси времени?
5. Как по графику проекции скорости определить перемещение (его проекцию), совершенное за определенное время равномерно и прямолинейно движущимся телом?

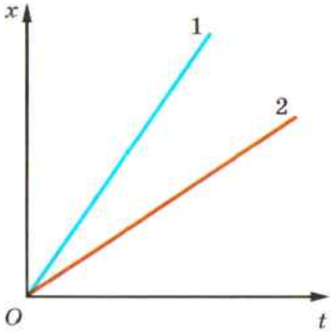


Рис. 30

6. Чем отличаются движения двух тел, графики которых приведены на рисунке 30?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 2

1. Наиболее простым видом механического движения является равномерное движение материальной точки вдоль прямой линии.
2. Равномерным прямолинейным движением называют такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.
   Перемещение — векторная величина.
3. Скоростью равномерного прямолинейного движения называют величину, равную отношению перемещения тела за любой промежуток времени к значению этого промежутка.
   Скорость — векторная величина. При равномерном прямолинейном движении направление скорости совпадает с направлением перемещения, при этом ни проекция скорости, ни модуль скорости не изменяются.
4. Перемещение тела при прямолинейном равномерном движении прямо пропорционально времени движения.

глава 3

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равномерное прямолинейное движение, рассмотренное в главе 2, встречается сравнительно редко. Равномерно и прямолинейно тела движутся лишь на небольших отрезках своей траектории, а на остальных участках их скорость изменяется. Движение с изменяющейся скоростью, когда за равные промежутки времени тело проходит разные пути, называют *неравномерным*. В этой главе мы будем изучать прямолинейное неравномерное движение.

§ 7. Скорость при неравномерном движении

В случае равномерного движения скорость постоянна на любом участке и ее можно определить через отношение любых перемещений к промежуткам времени, за которые эти перемещения произошли.

В случае неравномерного движения скорость изменяется, и на каждом, даже самом маленьком участке, она отличается от скорости на соседних участках. Поэтому для характеристики переменного движения понятие скорости расширяется: вводятся новые понятия «средняя скорость на участке» и «мгновенная скорость в точке».

Средняя скорость. Средняя скорость на каком-либо участке траектории определяется отношением перемещения ко времени, за которое это перемещение произошло:

$$\boxed{\vec{v}_{ср} = \frac{\vec{s}}{t}}$$

или в скалярной форме:

$$v_{ср} = \frac{s}{t}.$$

Рассмотрим пример неравномерного движения. Автомобиль, двигаясь по прямолинейному участку шоссе, за 2 ч переместился на 120 км. Средняя скорость его движения $v_{ср} = \frac{120 \text{ км}}{2 \text{ ч}} = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Но ясно, что автомобиль мог останавливаться перед светофором, т. е. какую-то часть времени не двигался, а отъезжая от него, увеличивал свою скорость, приближаясь к нему, — уменьшал. Все это при определении средней скорости мы не учитываем и считаем, что за час автомобиль проходил расстояние 60 км. Пользуясь формулой $\upsilon_{ср} = \frac{s}{t}$, мы как бы предполагаем, что автомобиль двигался равномерно со скоростью 60 км/ч, хотя может быть, за все время движения автомобиля его спидометр ни разу не показал это значение скорости.

В таблице 1 приведены значения средних скоростей движения некоторых тел.

Таблица 1

Тело	Скорость, м/с	Тело	Скорость, м/с
Улитка	0,0014	Молекула в атмосфере	500
Черепаха	0,05—0,14	Пуля	700
Пешеход	1,3		
Пловец	2	Реактивный истребитель	1000
Муха комнатная	5		
Спринтер	11	Луна вокруг Земли	1000
Конькобежец	13		
Охотничья собака	16	Искусственный спутник Земли	7900
Гепард	30		
Спортивный автомобиль	70	Земля вокруг Солнца	29 600
Авиалайнер	270	Электрон в атоме водорода	2 000 000

Мгновенная скорость. Если наблюдать за показаниями спидометра движущегося автомобиля, то можно заметить, что они изменяются. Стрелка прибора то замирает, то отклоняется от первоначального положения. Значит, автомобиль движется неравномерно, и его скорость с течением времени изменяется от точки к точке траектории движения.

Скорость в данной точке траектории в данный момент времени называют *мгновенной скоростью*. Как ее определить?

Допустим, мы изучаем движение лыжника, съезжающего с горы по прямой линии (рис. 31), и нас интересует его скорость в точке C.

Для начала определим среднюю скорость движения лыжника на всем спуске. Для этого нам надо узнать его перемещение $\vec{s}$ и время t, которое он затрачивает на спуск. И то и другое можно измерить, имея часы (секундомер) и рулетку или измерительную ленту. Это именно средняя скорость, потому что скорость непрерывно изменяется, и в разных точках спуска она разная.

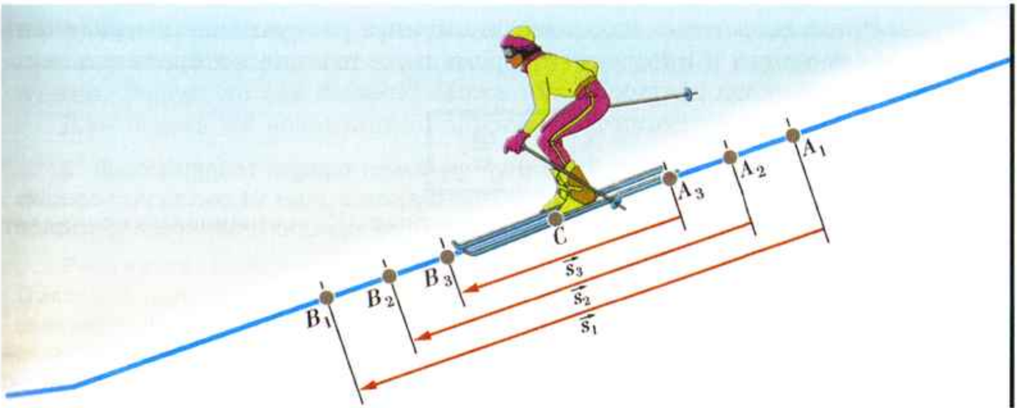


Рис. 31

Выделим небольшой участок A_1B_1 на траектории, включающий точку C. Измерив перемещение $\vec{s}_1$ и время t_1, мы можем найти среднюю скорость лыжника на этом участке: $\vec{v}_1 = \frac{\vec{s}_1}{t_1}$.

Уменьшим теперь длину участка. Выберем участок A_2B_2, тоже включающий точку C. Перемещение теперь равно $\vec{s}_2$, а совершил его лыжник за меньший промежуток времени t_2. На этом участке скорость успевает измениться на меньшую величину. Но отношение $\frac{\vec{s}_2}{t_2}$ равно средней скорости $\vec{v}_2$ на этом участке.

Найдем среднюю скорость на участке A_3B_3 (см. рис. 31). Средняя скорость на этом малом участке траектории равна: $\vec{v}_3 = \frac{\vec{s}_3}{t_3}$.

Продолжая процесс уменьшения перемещения, мы будем последовательно получать средние скорости, которые все меньше и меньше отличаются от скорости движения лыжника в точке C.

Наконец, на очень малом участке $\Delta\vec{s}$ (читается: дельта эс)[1], в середине которого находится точка C, средняя скорость будет очень мало отличаться от скорости в точке C и ее можно принять за скорость в точке C, т. е. это будет мгновенная скорость:

$$\vec{v}_C = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}.$$

Здесь $\Delta\vec{s}$ — очень малое перемещение лыжника, а Δt — очень малый промежуток времени, за который это перемещение совершено.

---

[1] Греческая буква Δ (дельта) в зависимости от текста означает, что величина или является очень малой, или изменяется.

Мгновенной скоростью называют величину, равную отношению очень малого перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\boxed{\vec{v} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}.}$$

Мгновенная скорость — величина векторная. Ее направление совпадает с направлением перемещения.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Из одного пункта в другой велосипедист первую половину времени двигался со скоростью 12 км/ч. Догнав приятеля, вторую половину он шел пешком со скоростью 4 км/ч. Какова средняя скорость велосипедиста?

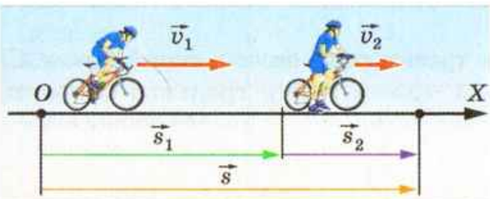


Рис. 32

Решение. Пусть система отсчета связана с дорогой, ось OX направлена в сторону движения. Хотя на каждом из двух участков пути велосипедист двигался равномерно, но скорости движения были разными, и поэтому в целом движение велосипедиста было неравномерным (рис. 32). Так как направления векторов перемещений $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$ и скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ совпадают с направлением оси OX, то их проекции равны модулям соответствующих величин:

$$s_{1x} = s_1,\ s_{2x} = s_2;\ v_{1x} = v_1,\ v_{2x} = v_2.$$

Поэтому уравнения движения можно записать в скалярной форме:

$$s_1 = v_1 t_1 \text{ и } s_2 = v_2 t_2.$$

Для определения модуля средней скорости $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$, где $t = t_1 + t_2$ — общее время движения, необходимо найти модуль перемещения $\vec{s}$ (см. рис. 32).

Его можно выразить следующим образом:

$$s = s_1 + s_2 = v_1 t_1 + v_2 t_2.$$

Подставив в формулу средней скорости полученное выражение для модуля перемещения, получим

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t} = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2}{t_1 + t_2}.$$

Так как по условию задачи $t_1 = t_2$, то

$$v_{\text{ср}} = \frac{12\,\frac{\text{км}}{\text{ч}} + 4\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}}{2} = 8\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Ответ: средняя скорость велосипедиста равна 8 км/ч.

* Обратите внимание, что средняя скорость велосипедиста (8 км/ч) оказалась равной полусумме скоростей его движения в начале и в конце движения. Всегда ли так бывает? Можно ли обобщить полученный результат? Для ответа на возникшие вопросы сформулируем задачу иначе.

2. Велосипедист первую половину пути при переезде из одного пункта в другой ехал со скоростью 12 км/ч, а вторую половину пути (из-за прокола шины) шел пешком со скоростью 4 км/ч. Определите среднюю скорость движения велосипедиста.

Решение. Выберем ту же систему отсчета, что и при решении первой задачи. Повторив приведенные выше рассуждения, получим уравнения движения велосипедиста на двух участках пути в скалярной форме: они такие же, как и в первой задаче:

$$s_1 = v_1 t_1,\ s_2 = v_2 t_2.$$

По-прежнему, чтобы определить модуль средней скорости $v_{ср}$, нужно модуль s полного перемещения ($s = s_1 + s_2$) разделить на общее время движения $t = t_1 + t_2$ (см. рис. 32):

$$v_{ср} = \frac{s}{t} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2}.$$

Время движения на первой части пути $t_1 = \frac{s_1}{v_1}$, а на второй части — $t_2 = \frac{s_2}{v_2}$,

$$t_1 + t_2 = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} = \frac{s_1 v_2 + s_2 v_1}{v_1 v_2}.$$

Подставив найденное выражение для времени движения в формулу средней скорости, получим:

$$v_{ср} = \frac{(s_1 + s_2) v_1 v_2}{s_1 v_2 + s_2 v_1}.$$

Так как по условию задачи $s_1 = s_2 = \frac{s}{2}$, то

$$v_{ср} = \frac{2 v_1 v_2}{v_1 + v_2};\ v_{ср} = \frac{2 \cdot 12\,\frac{км}{ч} \cdot 4\,\frac{км}{ч}}{12\,\frac{км}{ч} + 4\,\frac{км}{ч}} = 6\,\frac{км}{ч}.$$

Как видите, теперь средняя скорость отличается от полусуммы скоростей, и, значит, ее значение зависит не только от скоростей движения на отдельных участках пути, но и от длины каждого из них.*

Проверьте себя

1. Какую скорость (среднюю или мгновенную) определяют по формуле $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$?
2. Какую скорость (среднюю или мгновенную) измеряет спидометр автомобиля?

3. Автомобиль проезжал за каждый час 60 км. Можно ли утверждать, что его движение было равномерным?
4. Известна средняя скорость за определенный промежуток времени. Можно ли найти перемещение, совершенное за половину этого промежутка?
*5. Трамвай проехал первые 100 м со скоростью 5 м/с, а следующие 600 м — со скоростью 10 м/с. Определите среднюю скорость трамвая на всем пути.
*6. Велосипедист ехал из одного города в другой. Половину пути он ехал со скоростью 5 м/с. Далее половину оставшегося времени он ехал со скоростью 4 м/с, а затем (из-за прокола шины) шел со скоростью 1 м/с. С какой средней скоростью двигался велосипедист на всем пути?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

1. Средняя скорость движения некоторых тел очень мала: ледники «текут» со скоростью около метра в неделю, разломы земной коры смещаются на несколько сантиметров в год, Луна удаляется от Земли на 4 см в год.
2. Скорость света (а также скорость распространения радиоволн) в вакууме равна 300 000 000 м/с. Ни одно тело в мире не может иметь скорость, превышающую это значение.

§ 8. Ускорение. Равноускоренное движение

При неравномерном движении мгновенная скорость тела непрерывно меняется от точки к точке, от одного момента времени к другому. Например, если взять в руки камень и разжать пальцы, то при падении камня его скорость увеличивается. Скорость шайбы, скользящей по льду, с течением времени уменьшается до полной ее остановки.

Изменение скорости тела может происходить очень быстро (движение пули в канале ствола при выстреле из винтовки) и сравнительно медленно (движение поезда при его отправлении от вокзала).

Для характеристики быстроты изменения скорости вводится физическая величина — *ускорение*. Обозначают ускорение буквой a.

Рассмотрим такой пример. Гоночный автомобиль начинает движение по прямолинейному шоссе с возрастающей скоростью. Через 3 с его скорость стала равна 10 м/с, т. е. она увеличилась на 10 м/с. Через 6 с от начала движения скорость автомобиля оказалась равной 20 м/с, т. е. за 3 с она изменилась опять на 10 м/с и т. д. Мы видим, что за каждые 3 с скорость автомобиля увеличивается на 10 м/с.

Если тело движется так, что его скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково, то такое движение называют *равноускоренным*.

Пусть в начальный момент времени тело покоилось, а через промежуток времени t его скорость оказалась равной $\vec{v}$, тогда, чтобы узнать, на сколько скорость изменилась за единицу времени, надо изменение скорости $(\vec{v} - 0)$ разделить на промежуток времени t. Это отношение $\left(\frac{\vec{v}}{t}\right)$ и есть ускорение.

Если в начальный момент времени (момент начала наблюдения) тело уже имело некоторую скорость $\vec{v}_0$, то изменение скорости равно $\vec{v} - \vec{v}_0$, а для ускорения получается формула:

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.} \qquad (1)$$

Ускорением тела при его равноускоренном движении называют величину, равную отношению изменения скорости к промежутку времени, за который произошло это изменение.

Ускорение — векторная величина. Она имеет такое же направление, как и изменение скорости.

За единицу ускорения в Международной системе единиц принимают такое ускорение прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за 1 с ее скорость изменяется на 1 м/с. Эту единицу ускорения записывают так: 1 м/с^2 (читается: метр в секунду за секунду или метр на секунду в квадрате).

Используя понятие ускорения, равноускоренное прямолинейное движение можно определить как *движение с постоянным ускорением*.

В таблице 2 приведены значения ускорений некоторых тел.

Таблица 2

Тело	Ускорение, м/с^2	Тело	Ускорение, м/с^2
Лифт пассажирский при спуске	0,3—0,6	Ракета при запуске спутника	60
Поезд метрополитена при наборе скорости	≈1	Пуля в стволе автомата	600 000
Троллейбус при наборе скорости	≈1,8	Троллейбус при остановке	1,0—1,3

Окончание таблицы

Тело	Ускорение, м/с^2	Тело	Ускорение, м/с^2
Легковой автомобиль при наборе скорости	≈2	Легковой автомобиль при аварийном торможении	≈6
Свободно падающее тело	9,8		

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Разгон пассажирского самолета при взлете длился 25 с. К концу разгона самолет имел скорость 216 км/ч. Определите ускорение, с которым двигался самолет.

Решение. Поскольку скорость самолета увеличивалась, он двигался неравномерно. Однако в условии задачи не говорится о характере неравномерного движения. Предположим, что движение самолета было равноускоренным. За тело отсчета примем Землю, а начало разгона самолета — за начальный момент времени движения. Так как перед разгоном самолет был неподвижен, его начальная скорость $v_0 = 0$. Модуль ускорения найдем по формуле

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

Конечную скорость выразим в метрах в секунду

$$v = \frac{216\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = \frac{216\,000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = 60\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Тогда

$$a = \frac{60\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{25\ \text{с}} = 2{,}4\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ: $a = 2{,}4$ м/с^2.

Проверьте себя

1. Какое движение называют равноускоренным?
2. Дайте определение ускорения движения.
3. В каких единицах выражают ускорение?
4. Ускорение ракеты при запуске спутника равно 60 м/с^2. Что это означает?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Понятие ускорения впервые было введено Г. Галилеем, экспериментально изучавшим связь между скоростью падения тела и силой тяжести, действующей на это тело.

§ 9. Скорость равноускоренного движения

Мгновенная скорость равноускоренного движения. Выясним, как зависит мгновенная скорость тела от времени, если его ускорение постоянно.

По определению ускорение равно:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t},$$

откуда получается, что:

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.} \qquad (2)$$

Выражение (2) называют *уравнением скорости* равноускоренного движения.

Если $\vec{v}_0 = 0$, то формула (2) принимает вид:

$$\boxed{\vec{v} = \vec{a}t.} \qquad (3)$$

Запишем уравнения (2) и (3) для проекций векторов на ось координат.

При прямолинейном движении векторы $\vec{v}$, $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ направлены вдоль одной прямой — траектории движения. Вдоль этой же прямой направим координатную ось (например, ось OX). Обозначим проекции векторов $\vec{v}$, $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ на эту ось через v_x, v_{0x} и a_x.

Тогда из уравнений (2) и (3) следует, что

$$v_x = v_{0x} + a_x t \qquad (5)$$

и

$$v_x = a_x t. \qquad (6)$$

Знаки проекций v_x, a_x и v_{0x} определяются тем, как направлены векторы $\vec{v}$, $\vec{a}$ и $\vec{v}_0$ по отношению к оси.

При движении с возрастающей скоростью векторы $\vec{v}$, $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ сонаправлены (рис. 33, *а*). При торможении вектор $\vec{a}$ направлен противоположно векторам $\vec{v}$ и $\vec{v}_0$ (рис. 33, *б*).

Из формулы (6) видно, что мгновенная скорость (ее проекция) линейно зависит от времени. Графически эта зависимость изображается прямой линией, проходящей через начало координат (рис. 34, *а*).

*Если начальная скорость отлична от нуля, то для построения графика нужно пользоваться формулой (5). В этом случае графиком является прямая, которая пересекает ось ординат в точке, отстоящей от начала координат на расстоянии, равном проекции начальной скорости.

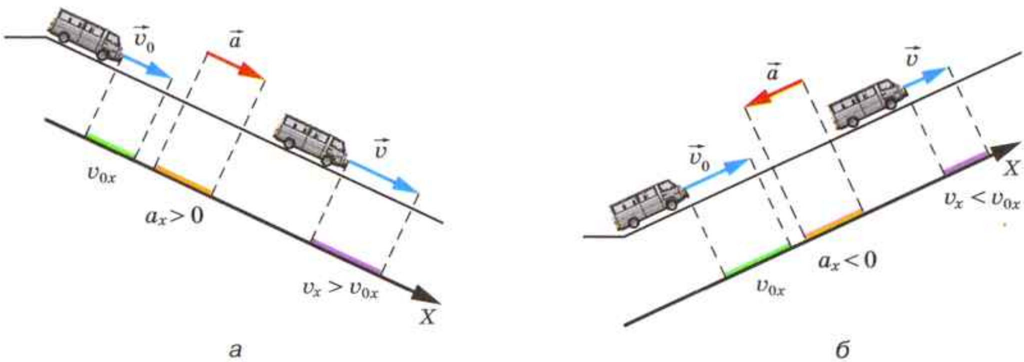


Рис. 33

На рисунке 34, *б* показан график для случая, когда проекция скорости в начальный момент времени положительна, и тело с равномерно возрастающей скоростью движется в том же направлении. График проекции скорости (рис. 34, *в*) построен для тела, движение которого с течением времени равномерно замедляется вплоть до полной остановки.*

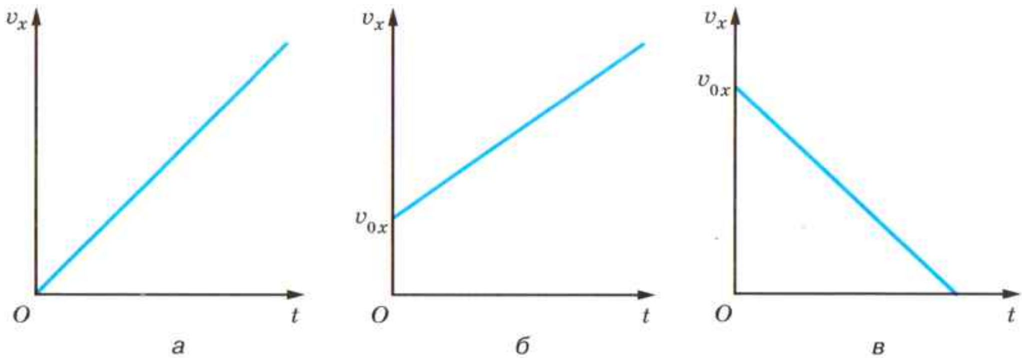


Рис. 34

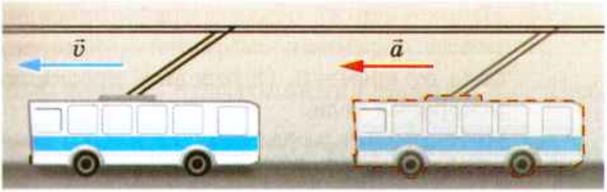
ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Троллейбус, трогаясь с места, движется с постоянным ускорением 1,5 м/с^2 в течение 5 с. Какую скорость приобретет троллейбус к концу 5-й секунды (рис. 35, *а*)?

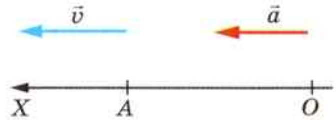
Решение. Координатную ось OX (точка O — начало движения) направим по направлению движения троллейбуса (рис. 35, *б*). Проекция a_x ускорения положительна и равна модулю ускорения.

Для определения проекции скорости воспользуемся формулой $v_x = a_x t$. Значит, $v_x = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 5\ \text{с} = 7{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: троллейбус к концу 5-й секунды будет иметь скорость $v = 7{,}5$ м/с.



а



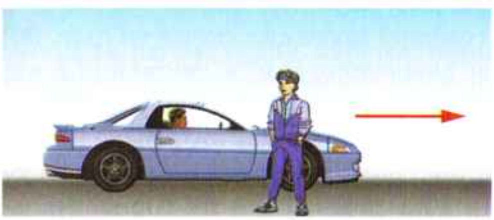
б

Рис. 35

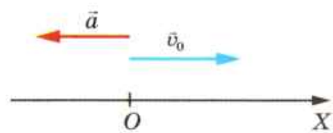
*2. Автомобиль проезжает мимо мальчика, двигаясь со скоростью 20 м/с (рис. 36, *а*). В этот момент водитель нажимает на тормоз и автомобиль начинает двигаться с ускорением, равным по модулю 0,8 м/с^2. Сколько времени пройдет до остановки автомобиля?

Решение. Координатную ось OX (точка O — место нахождения мальчика) направим в сторону движения автомобиля (рис. 36, *б*, где $\vec{v}_0$ — скорость автомобиля в момент прохождения мимо мальчика, $\vec{a}$ — ускорение после включения тормоза).

Воспользуемся формулой $v_x = v_{0x} + a_x t$. Здесь v_x, v_{0x} и a_x — соответственно проекции конечной скорости $\vec{v}$, начальной скорости $\vec{v}_0$ и ускорения $\vec{a}$ на ось OX.



а



б

Рис. 36

Проекция начальной скорости положительна и равна модулю скорости: $v_{0x} = v_0$, проекция ускорения отрицательна: $a_x = -a$. В момент остановки $v_x = 0$. Следовательно,

$0 = v_0 - at$, или $v_0 = at$. Отсюда $t = \dfrac{v_0}{a}$; $t = \dfrac{20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 25$ с.

Ответ: автомобиль остановится через 25 с.*

Проверьте себя

1. Тело движется равноускоренно с возрастающей скоростью. Укажите взаимное направление скорости, изменения скорости, ускорения.
2. Как направлено ускорение, если скорость тела уменьшается?
3. Чем отличается график скорости равномерного прямолинейного движения от графика скорости равноускоренного движения?

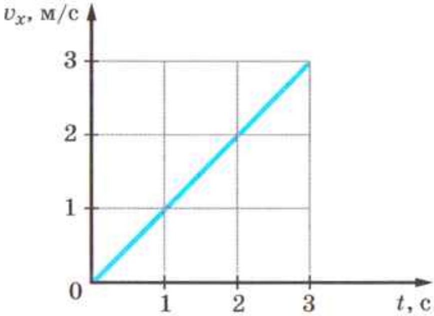


Рис. 37

4. На рисунке 37 показан график зависимости проекции скорости движения тела от времени. Определите проекцию ускорения тела.
5. Мотоциклист, подъезжая к уклону, имеет скорость 10 м/с и начинает двигаться с ускорением 0,4 м/с^2. Какую скорость приобретет мотоциклист через 30 с?

§ 10. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении

В § 6 мы показали, что по графику проекции скорости равномерного движения можно определить проекцию перемещения. Она равна площади прямоугольника под этим графиком (см. рис. 29).

Используя этот результат, можно по графику проекции скорости (рис. 38) определить проекцию перемещения при равноускоренном движении с начальной скоростью, отличной от нуля. Она равна площади фигуры $OABC$, заключенной между графиком и осью времени. Докажем это. Выделим на графике скорости малый участок ab (см. рис. 38). Для наглядности он изображен в увеличенном масштабе. Опустим из точек a и b на горизонтальную ось перпендикуляры. Под участком графика ab получилась узкая полоска $abcd$. Промежуток времени, соответствующий отрезку cd, достаточно мал. Скорость в течение этого промежутка времени заметно не изменяется. Движение за указанный промежуток времени можно считать равномерным. Полоска $abcd$ мало отличается от прямоугольника, поэтому можно считать, что ее площадь равна проекции перемещения за время cd.

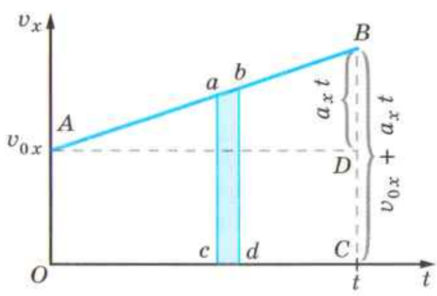


Рис. 38

На такие же узкие полоски можно разбить всю фигуру $OABC$, расположенную под графиком скорости. Применяя к ним то же рассуждение, придем к заключению, что проекция перемещения за все время t будет равна площади фигуры $OABC$.

Найдем ее. Фигура $OABC$ представляет собой треугольник ABD и прямоугольник $OADC$. Площадь треугольника равна половине произведения его основания на высоту. Высота его в определенном масштабе равна $a_x t$, основание — t.

Площадь треугольника равна $\frac{a_x t^2}{2}$. Площадь прямоугольника равна произведению основания t на высоту υ_{0x}, т. е. $\upsilon_{0x}\, t$.

Так как площадь фигуры $OABC$ равна сумме площадей треугольника ABD и прямоугольника $OADC$, то для проекции перемещения равноускоренного движения получается формула:

$$\boxed{s_x = \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}.} \qquad (1)$$

В случае, когда тело движется равноускоренно из состояния покоя, его начальная скорость $\vec{\upsilon}_0$ равна нулю. Тогда выражение (1) запишется так:

$$\boxed{s_x = \frac{a_x t^2}{2}.} \qquad (2)$$

*Для вычисления перемещения можно получить другую формулу, в которую не входит время движения.

Из выражения $\upsilon_x = \upsilon_{0x} + a_x t$ найдем время: $t = \frac{\upsilon_x - \upsilon_{0x}}{a_x}$ и подставим в формулу (1). Тогда получим:

$$s_x = \frac{\upsilon_{0x}(\upsilon_x - \upsilon_{0x})}{a_x} + \frac{a_x}{2}\left(\frac{\upsilon_x - \upsilon_{0x}}{a_x}\right)^2.$$

Отсюда

$$s_x = \frac{\upsilon_x^2 - \upsilon_{0x}^2}{2a_x}, \qquad (3)$$

или

$$\upsilon_x^2 - \upsilon_{0x}^2 = 2a_x s_x. \qquad (4)$$

Если начальная скорость υ_0 равна нулю, то формулы (3) и (4) принимают вид:

$$s_x = \frac{\upsilon_x^2}{2a_x} \text{ и } \upsilon_x^2 = 2a_x s_x.\text{*}$$

*Движение тел, которые из состояния покоя движутся равноускоренно, обладает свойством, которое формулируется так: *модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени, относятся как ряд нечетных последовательных чисел.*

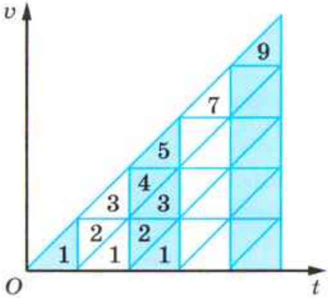


Рис. 39

Убедимся, что это действительно так. Рассмотрим график зависимости модуля скорости от времени при $v_0 = 0$ (рис. 39). Разобьем площадь треугольника (определяющую модуль перемещения за время t) на маленькие треугольнички так, как это сделано на рисунке. Мы видим, что модуль s_1 перемещения за первый промежуток времени равен площади треугольника *1*. Модуль s_2 перемещения за следующий такой же промежуток времени равен площади *трех* таких треугольников; модуль s_3 равен площади *пяти* треугольников и т. д. Следовательно,

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : ... = 1 : 3 : 5 : 7 : ... .$$

Это свойство было установлено Г. Галилеем. Им можно пользоваться, чтобы определить, является движение равноускоренным или нет.*

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Автомобиль, двигавшийся со скоростью 36 км/ч, на участке дороги с уклоном стал двигаться с ускорением 0,1 м/с^2. В конце уклона скорость его движения достигла 54 км/ч. За какое время произошло это увеличение скорости? Какое перемещение совершил автомобиль за это время?

Решение. Координатную ось OX (точка O — начало спуска) направим вдоль дороги по направлению движения.

Для определения времени воспользуемся формулой:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \qquad (1)$$

Так как движение происходит с увеличивающейся скоростью, то все проекции на ось OX положительны и равны модулям соответствующих векторов: $a_x = a$, $v_x = v$, $v_{0x} = v_0$.

Тогда формула (1) принимает вид:

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

Отсюда найдем время:

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

Подставив значения величин, приведенные в условии задачи (предварительно скорости надо выразить в метрах в секунду), получим:

$$t = \frac{15\,\frac{\text{м}}{\text{с}} - 10\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}1\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 50\ \text{с}.$$

Чтобы определить перемещение автомобиля за это время, применим формулу:

$$s_x = (v_{ср})_x t. \quad (2)$$

Здесь

$$(v_{ср})_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2}.$$

Тогда

$$s_x = \frac{v_0 + v}{2} t;$$

$$s_x = \frac{10\ \frac{м}{с} + 15\ \frac{м}{с}}{2} \cdot 50\ с = 625\ м.$$

Так как проекция s_x положительна, то модуль перемещения $s = s_x$; $s = 625$ м.

Ответ: $t = 50$ с, $s = 625$ м.

Проверьте себя

1. Чем различаются зависимости перемещения от времени при равномерном и равноускоренном движениях?
2. Тело, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, за первые 3 с совершило перемещение, равное 10 м. Какое перемещение совершит это тело, двигаясь из состояния покоя, за 9 с?
3. При подходе к станции машинист электровоза включил торможение, после чего поезд стал двигаться с ускорением, по модулю равным 2 м/с^2. Какое расстояние пройдет состав до остановки, если в начале торможения скорость поезда была 72 км/ч?

*4. Автомобиль трогается с места и, двигаясь равноускоренно, через 1 мин развивает скорость 54 км/ч. Определите ускорение, с которым он двигался, среднюю скорость движения и пройденное автомобилем расстояние.

*5. Докажите, что при равноускоренном движении проекция средней скорости тела всегда равна полусумме проекций его начальной и конечной скоростей:

$$v_{ср_x} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}.$$

*6. Автомобиль начал движение с ускорением 1 м/с^2. Какой путь он проедет за 10 с?

§ 11. Свободное падение тел

Из материала предыдущих параграфов вы узнали, что такое равноускоренное движение и какие величины его характеризуют. Одним из примеров прямолинейного равноускоренного движения может служить свободное падение тел на Землю.

Свободным падением называют движение тел под действием силы тяжести в вакууме, когда их движению не мешает воздух.

Изучение свободного падения можно проводить на опыте, наблюдая падение достаточно массивного стального шарика в воздухе. Конечно, воздух будет оказывать движению шарика сопротивление, но, как показывают наблюдения, если шарик массивный и его скорость невелика, это сопротивление практически не влияет на его движение и им можно пренебречь.

В § 1 мы упомянули, что исследование свободного падения тел проводил Г. Галилей. Он впервые установил, что свободное падение является равноускоренным движением. Рассмотрим, как он это сделал.

Падение тел происходит быстро, а в то время было трудно измерять малые отрезки времени — точных часов еще не было. Поэтому вместо свободного падения Галилей стал исследовать медленное скатывание шаров по наклонному желобу, предположив, что законы свободного падения и законы скатывания одинаковы. Как это доказать?

Сначала Галилей установил, что скатывание одинаковых по диаметру деревянных, костяных и чугунных шаров при одном и том же наклоне желоба происходит за одинаковое время, т. е. с одинаковым ускорением. Значит, ускорение шаров не зависит от их массы!

Далее ученый обнаружил, что с увеличением наклона желоба ускорение шаров увеличивается, но одинаково для шаров разной массы (см. рисунок на обложке учебника): при любом угле наклона движение шаров остается равноускоренным.

Поскольку свободному падению соответствует угол наклона желоба, равный 90°, то, основываясь на проведенных опытах, Галилей предположил: *тела любой массы должны свободно падать с постоянным и одинаковым ускорением*.

Подтверждение своей гипотезы Галилей, по преданию, получил, экспериментируя на Пизанской башне (см. с. 12)[1]. В § 1 мы рассказывали

Галилей Галилео (1564—1642) — итальянский физик и астроном, впервые применивший экспериментальный метод исследования в науке. Галилей открыл закон инерции, законы падения тел. Построил первый телескоп, при помощи которого открыл горы на Луне, четыре спутника планеты Юпитер, звездное строение Млечного Пути, пятна на Солнце, фазы Венеры.

Галилей поддержал учение Коперника о движении Земли и других планет вокруг Солнца, за что в 1633 году был осужден судом инквизиции. Приговор был отменен Ватиканом 350 лет спустя.

[1] Интересно, что Галилею в это время было всего 25 лет.

также об опытах с трубкой, из которой откачан воздух. В них справедливость гипотезы Галилея становится очевидной.

Ускорение свободного падения тел на Землю впервые измерил X. Гюйгенс в 1656 году. Вблизи поверхности Земли оно равно 9,8 м/с^2.

Чтобы отличить свободное падение от всех других ускоренных движений, ускорение свободного падения принято обозначать буквой g. Вектор ускорения свободного падения всегда направлен вертикально вниз.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

С высоты 19,6 м свободно падало тело. Сколько времени оно падало? Какой была его скорость в конце падения?

Решение. Направим ось OX по направлению движения, тогда с учетом того, что начальная скорость отсутствует, можно записать: $v_x = a_x t$. Здесь $a_x = g = 9{,}8$ м/с^2.

Время падения можно определить из уравнения движения $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$, или $h = \frac{gt^2}{2}$, так как $s_x = h$.

Тогда

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 19{,}6 \text{ м}}{9{,}8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} = 2 \text{ с};$$

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

Ответ: $t = 2$ с; $v = 19{,}6$ м/с.

Примечание. Для определения скорости можно применить формулу $v_x^2 = 2a_x s_x$.

Проверьте себя

1. Какое движение называют свободным падением?
2. Какой ученый начал изучать падение тел?
3. Из каких фактов следует, что свободное падение тел — движение равноускоренное?
4. Вспомните опыт, изображенный на рисунке 8. О чем он свидетельствует?

*5. Тело брошено вертикально вверх со скоростью 9,8 м/с. Определите время и высоту подъема. С какой скоростью тело упадет на землю?

*6. Тело брошено вертикально вверх со скоростью 40 м/с. Какова будет его скорость через 2 с? На какую высоту оно поднимется за это время?

*7. Мячик бросили с балкона вертикально вниз со скоростью 5 м/с. Через 2 с он упал на землю. С какой высоты его бросили?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

На Луне нет атмосферы и там падению тел ничто не мешает. Наблюдения падения птичьего пера и молотка на поверхность Луны, выполненные американскими астронавтами Д. Скоттом и Дж. Ирвингом, показали, что эти предметы при падении с одной и той же высоты достигают лунной поверхности одновременно.

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 2

1. Один из наиболее распространенных видов движения — неравномерное прямолинейное движение, при котором скорость движения изменяется.
2. Для характеристики неравномерного прямолинейного движения используют понятие средней скорости на данном участке траектории:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}$$

или в проекциях на ось OX:

$$v_{\text{ср}.x} = \frac{s_x}{t}.$$

3. Если тело движется так, что его скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково, то такое движение называют равноускоренным.
4. Изменение скорости с течением времени характеризует физическая величина — ускорение.
Ускорением тела при его равноускоренном прямолинейном движении называют величину, равную отношению изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

или в проекциях на ось OX:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

5. Мгновенную скорость при равноускоренном движении находят по формуле

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

или в проекциях на ось OX:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

Проекция перемещения равна:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

6. Движение тел под действием силы тяжести в вакууме называется свободным падением. Ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли по модулю равно 9,8 м/с^2.

глава 4

ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

До сих пор вы изучали прямолинейные движения; их траектории — прямые линии. Но гораздо чаще движения происходят по кривым линиям. Так, кончик пера вашей ручки при письме движется по кривым линиям; футбольный или волейбольный мяч после удара спортсмена также движется по криволинейной траектории; по кривой линии движутся автомобили при переезде с одной дороги на другую, космические тела и т. д.

Изучить все виды криволинейных движений невозможно, да и нет в этом необходимости: почти любое криволинейное движение можно представить как последовательность движений, происходящих по дугам окружностей разных радиусов (рис. 40).

Поэтому мы изучим движение материальной точки по окружности.

§ 12. Равномерное движение материальной точки по окружности

В окружающей нас жизни мы встречаемся с движением по окружности довольно часто. Так движутся стрелки часов и зубчатые колеса их механизмов; так движутся автомобили и поезда по выпуклым мостам и на закруглениях дорог; по круговым орбитам движутся многочисленные искусственные спутники Земли (рис. 41) и естественные спутники других

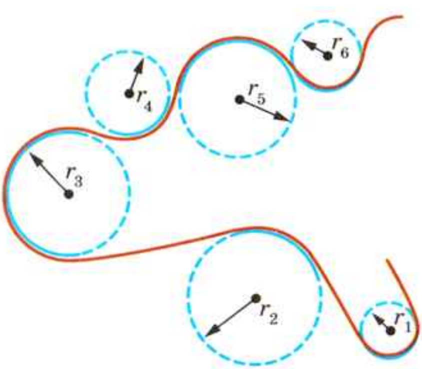


Рис. 40

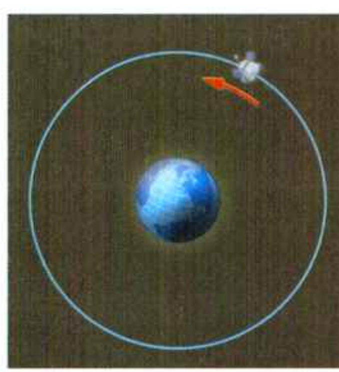


Рис. 41

Рис. 42

планет, а также точки на вращающихся телах (рис. 42). Наконец, наша родная планета, — наш собственный космический корабль, обитателями которого мы все являемся, — обращается вокруг Солнца, делая один оборот за 365 дней.

Перемещение. Допустим, что материальная точка двигалась по окружности и в момент времени t_1 находилась в точке A, а в момент времени t_2 заняла положение B (рис. 43). Пройденный точкой за это время путь — это длина дуги AB, а перемещение — это вектор $\overrightarrow{AB}$, т. е. направленный отрезок прямой, соединяющий точки A и B.

Мгновенная скорость. В случае прямолинейного движения как средняя, так и мгновенная скорость тела всегда направлена вдоль вектора перемещения. Что можно сказать о направлении мгновенной скорости тела в случае его движения по окружности? Вспомним, что мгновенной скоростью тела мы назвали его среднюю скорость за очень малый промежуток времени.

Будем последовательно уменьшать время движения тела из точки A. При этом конечные положения тела — точки B_1, B_2, B_3, ... , B_n — будут приближаться к точке A, а соответствующие перемещения $\overrightarrow{AB_1}$, $\overrightarrow{AB_2}$, $\overrightarrow{AB_3}$, ... , $\overrightarrow{AB_n}$ — укорачиваться (рис. 44). Отметим, что за каждый промежуток времени вектор средней скорости $\vec{v}_1$, $\vec{v}_2$, $\vec{v}_3$, ... , $\vec{v}_n$ — по-прежнему направлен вдоль соответствующего перемещения (см. рис. 44).

Продолжая уменьшать промежуток времени, мы настолько сблизим точки A и B, что направление вектора перемещения $\overrightarrow{AB_n}$ будет сколь угодно мало отличаться от направления касательной к окружности в точке A.

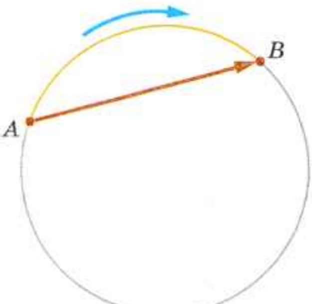


Рис. 43

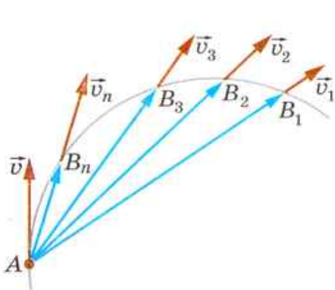


Рис. 44

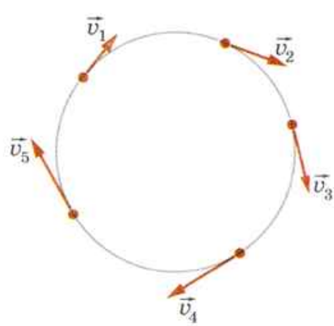


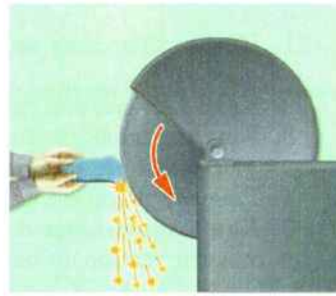
Рис. 45

Мгновенная скорость тела (материальной точки), движущейся по окружности, направлена по касательной к ней в этой точке (рис. 45). Это нетрудно наблюдать. Если маленькие частицы отделяются от вращающегося тела, то они летят с той скоростью, которой обладали в момент отрыва. Хорошо видно, что грязь из-под колес буксующего автомобиля летит по касательной к окружности колес (рис. 46, *а*). Также по касательной летят раскаленные частицы металла, отрывающиеся от стального резца, если коснуться им поверхности вращающегося точильного камня (рис. 46, *б*).

Таким образом, мгновенная скорость тела (материальной точки) в разных точках окружности имеет различные направления (см. рис. 45). По модулю же скорость может изменяться от точки к точке или быть одинаковой.

Мы будем изучать движение точки по окружности с постоянной по модулю скоростью. Его называют *равномерным движением по окружности*.

а



б

Рис. 46

Линейная скорость. Скорость точки, движущейся по окружности, часто называют *линейной скоростью*. Если точка движется по окружности равномерно и за время t проходит путь l, равный длине дуги AB, то линейная скорость (ее модуль) равна

$$\boxed{v = \frac{l}{t}.}$$

Ускорение. Равномерное движение по окружности — это движение с ускорением, хотя модуль скорости не изменяется. Но направление скорости непрерывно изменяется. Следовательно, в этом случае ускорение $\vec{a}$ должно характеризовать изменение скорости по направлению.

Вектор ускорения $\vec{a}$ при равномерном движении точки по окружности направлен по радиусу к центру окружности (рис. 47), поэтому

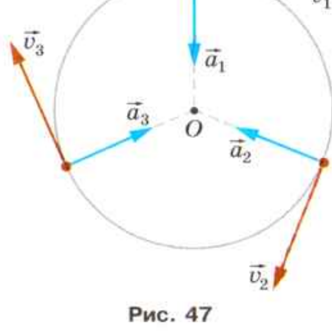


Рис. 47

его называют *центростремительным*. Модуль ускорения определяется по формуле:

$$\boxed{a = \frac{v^2}{R},}$$

где v — модуль скорости движения точки, R — радиус окружности. С доказательством этих утверждений вы познакомитесь в дальнейшем.

Проверьте себя

1. Как направлена мгновенная скорость при движении точки по окружности?
2. Какое движение точки по окружности называют равномерным?
3. Как определяют линейную скорость, если точка совершает равномерное движение по окружности?
4. Почему равномерное движение по окружности является ускоренным?
5. Как направлены векторы скорости и ускорения при равномерном движении точки по окружности?

§ 13. Период и частота обращения

Период обращения. Движение тела (материальной точки) по окружности часто характеризуют не скоростью движения v, а промежутком времени, за который тело совершает один полный оборот. Эта величина называется *периодом обращения*. Обозначают ее буквой T. Например, Земля делает полный оборот вокруг Солнца за 365 сут, т. е. $T = 365$ сут.

При расчетах период обычно выражают в секундах.

Если известен период обращения T, то можно найти линейную скорость v. За время t, равное периоду T, тело проходит путь, равный длине окружности:

$$l = 2\pi R.$$

Следовательно,

$$v = \frac{l}{T} = \frac{2\pi R}{T}.$$

Подставив это выражение в формулу для центростремительного ускорения, получим для него другое выражение:

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Частота обращения. Движение тела (точки) по окружности можно характеризовать еще одной величиной — числом оборотов по окружности в единицу времени. Ее называют частотой *обращения* и обозначают греческой буквой ν (читается: ню).

Частота обращения и период обращения связаны следующим соотношением:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Действительно, если за время t точка совершила N полных оборотов, то период обращения $T = \frac{t}{N}$, а частота обращения $\nu = \frac{N}{t}$.

Единица частоты — это $\frac{1}{\text{с}}$.

Используя понятие частоты, получим формулы для скорости и ускорения:

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi\nu R; \quad a = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2\nu^2 R.$$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Спутник движется по круговой орбите на высоте 630 км. Период обращения спутника вокруг Земли равен 97,5 мин. Радиус Земли 6370 км. Определите скорость и центростремительное ускорение спутника.

Решение. Для вычисления скорости и центростремительного ускорения следует воспользоваться формулами, в которые входит период обращения, так как он известен:

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} \text{ и } a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Здесь R — радиус окружности, по которой обращается спутник; он равен сумме радиуса Земли и высоты спутника над поверхностью Земли: $R = R_З + h$.

Выполним вычисления:

$$\upsilon = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 7\,000\,000 \text{ м}}{97{,}5 \cdot 60 \text{ с}} \approx 7514 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$a = \frac{4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 7\,000\,000 \text{ м}}{(97{,}5 \cdot 60)^2 \text{ с}^2} \approx 8{,}1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ: $\upsilon \approx 7514$ м/с; $a \approx 8{,}1$ м/с^2.

Проверьте себя

1. Что такое период обращения?
2. Что такое частота обращения?
3. Чему равна частота обращения концов часовой и минутной стрелок часов?
4. Как центростремительное ускорение зависит от радиуса окружности, по которой движется тело?

5. Длина минутной стрелки часов в два раза больше часовой. Во сколько раз отличаются ускорения точек на концах этих стрелок?
6. Автомобиль проезжает закругление дороги со скоростью 60 км/ч. Каково центростремительное ускорение автомобиля, если радиус закругления 100 м?
7. Определите линейную скорость движения Луны вокруг Земли, зная, что расстояние до Луны 384 000 км и что период ее обращения 27,3 сут. Ответ выразите в километрах в секунду.

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 4

1. При равномерном движении по прямой линии скорость остается постоянной и по модулю и по направлению, а ускорение отсутствует.
2. При равномерном движении по окружности скорость постоянна по модулю и непрерывно изменяется по направлению. Ускорение при этом (центростремительное ускорение) также постоянно по модулю $\left(a = \frac{v^2}{R}\right)$, но непрерывно изменяется по направлению и всегда направлено к центру окружности.
3. Равномерное движение по окружности характеризуется не только скоростью v, но и периодом обращения T и частотой обращения ν. Период обращения — это промежуток времени, в течение которого точка совершает один полный оборот. Частота обращения — это число оборотов по окружности в единицу времени.

глава 5

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

В предыдущих главах вы познакомились с различными движениями тел. Они различаются не только формой траектории (прямолинейные, криволинейные). Главное отличие одного движения от другого — это ускорение. Например, движение может быть равномерным прямолинейным, при этом ускорение равно нулю; или равноускоренным прямолинейным, тогда ускорение постоянно по модулю и направлению. В этих и других случаях мы изучали, как происходит движение: с постоянной или с изменяющейся скоростью, и описывали эти движения.

Теперь мы поставим вопрос: почему происходит *изменение скорости* тел? На этот вопрос отвечает главный раздел механики — динамика (от греческого слова *dýnamis* — «сила»).

Основу динамики составляют законы движения тел, которые были сформулированы английским физиком Исааком Ньютоном в его работе «Математические начала натуральной философии», опубликованной в 1687 году. Мы сознательно применили слово «сформулированы», а не «открыты». Дело в том, что изучением движения занимались многие ученые, жившие до Ньютона. Особенно много сделал Галилео Галилей. Ньютон тщательно изучил и творчески обобщил работы своих предшественников. Это позволило ему не только развить учение о движении дальше, но и создать законченную теорию механического движения, которая впоследствии только уточнялась.

Ньютон Исаак (1643—1727) — английский физик и математик, основатель классической физики. Важнейшие исследования относятся к механике, оптике, астрономии и математике.
Ньютон сформулировал основные законы и понятия механики, открыл закон всемирного тяготения. В оптике Ньютон открыл явление разложения белого света на цвета, объяснил происхождение цветов. Результаты этих открытий и исследований были опубликованы в двух книгах — «Математические начала натуральной философии» и «Оптика». Дав теоретическое объяснение многим явлениям природы на основе открытых законов, Ньютон сформулировал основные положения физической картины мира, оказавшие огромное влияние на ход последующих физических исследований.

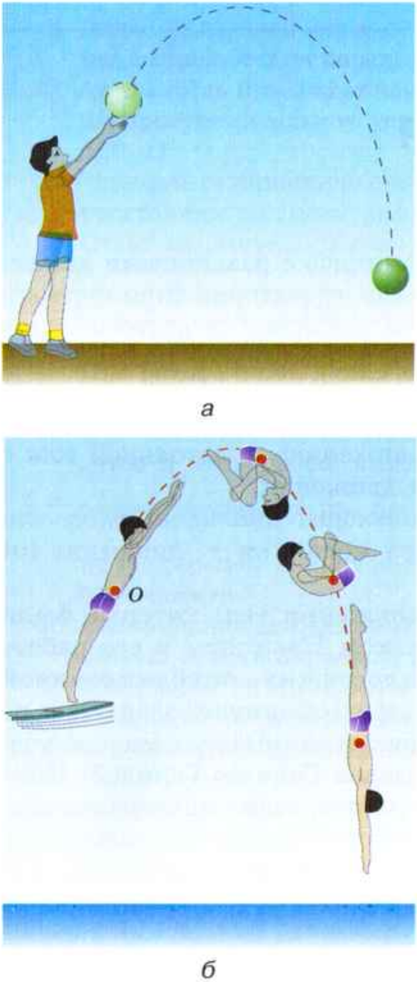


Рис. 48

Объектами в этой теории являются тела, которые можно заменить их моделью — материальной точкой. На рисунке 48, *а* показана траектория движения мячика. Мячик можно считать материальной точкой, так как его размерами по сравнению с пройденным расстоянием можно пренебречь. На рисунке 48, *б* показаны положения прыгуна в воду на различных этапах прыжка. Размерами его тела пренебречь нельзя. Однако в теле можно выделить точку *O*, которая описывает такую же траекторию, как и брошенный мяч. Эту точку называют *центром масс*. Движение бруска (рис. 49, *а*), шарика (рис. 49, *б*), тележки (рис. 49, *в*) вдоль горизонтальной или наклонной поверхности можно описать движением их центра масс *O*. Как находится положение центра масс тела, вы узнаете в дальнейшем.

Приступая к изучению законов движения, следует иметь в виду, что все они являются обобщением наблюдений и опытных фактов.

Приводимые ниже описания реальных опытов и мысленных экспериментов[1] не доказывают законы, а лишь помогают понять их сущность. Чтобы проще было понять законы Ньютона, мы будем изучать их отдельно один от другого, хотя все законы движения взаимосвязаны и образуют единую систему.

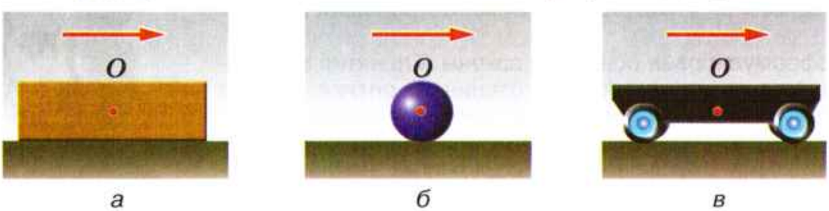


Рис. 49

[1] Мысленными экспериментами называют такие воображаемые опыты, которые проводятся мысленно (в уме).

§ 14. Первый закон Ньютона — закон инерции

Первый закон движения был известен уже Галилею. Ньютон его четко сформулировал и включил в систему законов динамики.

Опыты, помогающие понять первый закон Ньютона. Допустим, что на горизонтальном столе лежит брусок. Действующие на него сила тяжести и сила реакции опоры уравновешивают (компенсируют) друг друга. Повседневные наблюдения убеждают в том, что брусок будет лежать до тех пор, пока на него не подействует какое-либо другое тело и не выведет из этого состояния.

Рассмотренный пример, равно как и другие многочисленные наблюдения, свидетельствует о том, что тела сохраняют состояние покоя, если на них не действуют другие тела.

Поставим на горизонтальный стол наклонную доску. Стол около основания доски покроем грубой наждачной бумагой. Отпустим в верхней части желоба брусок. Брусок, опустившись по доске, начнет двигаться по горизонтальному столу, но вскоре остановится (рис. 50, *а*). Причина остановки, по-видимому, — трение бруска о наждачную бумагу. Чтобы проверить сделанное предположение о причине остановки бруска, уберем бумагу и повторим опыт. Брусок (рис. 50, *б*), прежде чем остановиться, пройдет по столу бо́льшее расстояние.

Если на стол впритык к доске положить стекло или другой предмет с гладкой поверхностью, брусок продвинется еще дальше (рис. 50, *в*). Наконец, приставим к наклонной доске полый горизонтальный желоб, в котором по всей его длине сделано много маленьких отверстий, через которые с помощью пылесоса продувается воздух. (В этом случае брусок будет находиться на «воздушной подушке», значительно уменьшающей трение.) Повторив опыт, мы заметим, что брусок легко движется вдоль всего желоба (рис. 50, *г*).

Проделанные опыты подтверждают наше предположение о том, что причиной остановки бруска служит трение: чем оно меньше, тем больше расстояние, проходимое бруском.

Представим себе, что трение исчезло. Очевидно, в этом случае брусок будет двигаться равномерно и прямолинейно, пока на него не подействуют другие тела и не изменят скорость его движения.

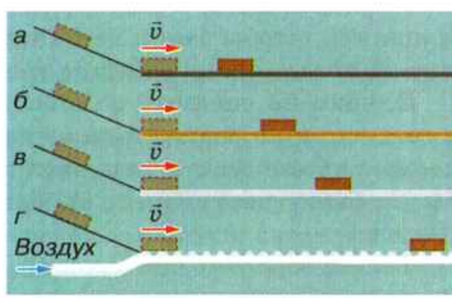


Рис. 50

Явление сохранения скорости тела постоянной (в частности, скорости, равной нулю) называют *инерцией* (от латинского слова *inertia* — «неподвижность, бездеятельность»). *Движением по инерции* называют движение тела, на которое не действуют другие тела («свободного» тела).

Первый закон Ньютона. Мы проанализировали вопросы о покое тел и о движении бруска. Впервые такой анализ всесторонне и глубоко провел Г. Галилей и пришел к выводу, что в том случае, когда на тело не действуют другие тела, оно либо находится в покое, либо движется прямолинейно и равномерно.

До Галилея в течение многих веков господствующим было учение о том, что тело не может двигаться, если на него не действуют другие тела (силы), авторство которого приписывают греческому ученому Аристотелю.

Как и другие ученые XVII в., Ньютон был убежден в правоте Галилея, поэтому он использовал его вывод в качестве одного из законов движения. Ньютон сформулировал его в следующем виде:

Всякое тело сохраняет свое первоначальное состояние относительного покоя или прямолинейного равномерного движения, пока на него не подействуют другие тела и не изменят это состояние.

Закон, открытый Галилеем, называют и *законом инерции* и *первым законом Ньютона*.

Не противоречит ли первый закон Ньютона опыту? Первая часть закона инерции подтверждается на каждом шагу: относительный покой тел нарушается только под действием других тел. Однако вторая часть закона как будто противоречит повседневной практике. Согласно закону тела должны двигаться прямолинейно и равномерно сами, по инерции. Но в жизни мы сталкиваемся с прямо противоположным: чтобы тело двигалось прямолинейно и равномерно, на него должно действовать другое тело. Например, чтобы санки двигались, их надо тянуть. Автомобиль движется только тогда, когда работает двигатель.

Однако не спешите сомневаться в справедливости закона. Все дело в том, что и на санки, и на автомобиль действует сила трения, которую и должна уравновесить сила тяги человека или двигателя автомобиля. Если бы не было сил трения, ни санки, ни автомобиль не нужно было бы тянуть.

Таким образом, *тела могут находиться в относительном покое или двигаться прямолинейно и равномерно и в том случае, когда в направлении движения действие на них других тел уравновешено.*

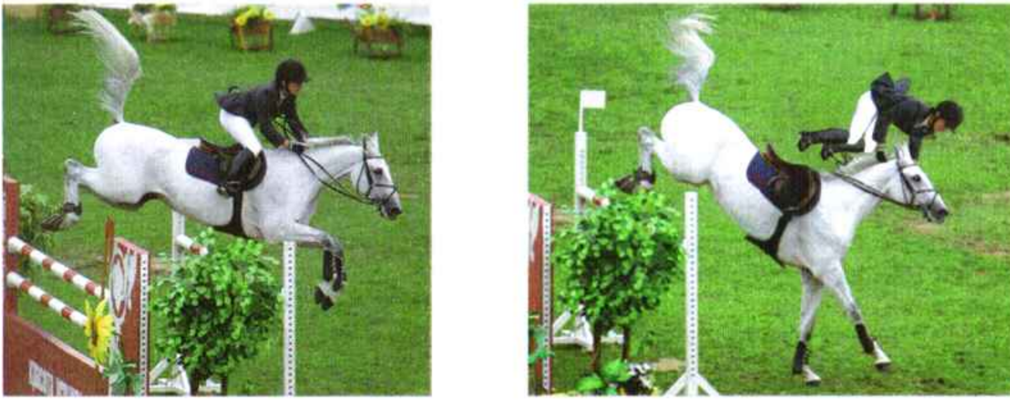


Рис. 51

Значит, равномерное и прямолинейное движение автомобиля с работающим двигателем это тоже проявление инерции. И вообще, не нужно думать, что инерция проявляется в основном только в идеализированных, далеких от жизни ситуациях, когда полностью отсутствует трение. Вспомните, что о человеке, теряющем равновесие и падающем вперед в резко затормозившем автобусе, говорят: он движется по инерции. По инерции летит через голову лошади всадник, если лошадь неудачно приземлилась после прыжка через барьер (рис. 51); по инерции летит через руль велосипеда спортсмен, по неосторожности наехавший на препятствие.

Проверьте себя

1. Как формулируется первый закон Ньютона?
2. Приведите примеры, подтверждающие первый закон Ньютона.
3. Нельзя ли первый закон Ньютона вывести путем логических рассуждений? экспериментально?
4. В чем заключается явление инерции?
5. Приведите собственные примеры проявления инерции в окружающей жизни.
6. Среди перечисленных ситуаций укажите те, где речь идет о явлении инерции: а) при выбивании ковра из него летит пыль; б) при заточке резца от точильного камня летят искры; в) пузырек воздуха равномерно всплывает в аквариуме; г) человек, поскользнувшись, падает на спину; д) топор насаживают на топорище, резко ударяя топорищем о твердую опору; е) книга лежит на столе.
7. Почему мы можем стряхнуть грязь и снег с обуви, топая ногами?

§ 15. Взаимодействие тел. Масса тела

Ускорение тел при взаимодействии. В 7-м классе, рассматривая разные случаи взаимодействия тел, мы установили, что одним из результатов взаимодействия является изменение скорости по модулю и по направлению. Напомним эти примеры и дополним их новыми.

Хоккейная шайба, лежавшая на льду, после удара клюшкой движется, т. е. меняет свою скорость, а значит, в процессе удара имеет ускорение. Та же шайба в результате удара о борт, отскочив от него, изменяет направление движения, т. е. во время соударения также движется ускоренно. Траектория стального шарика, скатывающегося с наклонной плоскости, искривляется, если вблизи него находится магнит (рис. 52), т. е. шарик под действием магнита движется с ускорением.

Таким образом, *причиной ускорения является взаимодействие тел.*

Опыты, которые можно провести с разными телами, показывают, что при взаимодействии оба тела получают ускорения, направленные в противоположные стороны. Кроме того, *при любых взаимодействиях двух данных тел отношение модулей их ускорений всегда одно и то же.*

Проделаем такой опыт. Возьмем две одинаковые, например стальные, тележки, к одной из которых прикреплена упругая стальная пластинка. Согнем пластинку и свяжем ее нитью. Поставим по другую сторону от согнутой пластинки вторую тележку (рис. 53, *а*). Пережжем нить — пластинка резко распрямляется и тележки приходят в движение в противоположные стороны, причем перемещаются они на одинаковые расстояния (рис. 53, *б*). Следовательно, за время взаимодействия обе тележки приобрели одинаковые скорости.

Заменим вторую тележку другой, такого же размера, но из другого материала, например алюминиевой. Повторив опыт, мы увидим, что теперь тележки проходят разные расстояния, т. е. они приобрели разные скорости.

Если измерить ускорения тележек при взаимодействии, то мы увидим, что модуль a_1 ускорения алюминиевой тележки в три раза больше модуля a_2 ускорения стальной тележки. Это значение не изменилось бы и в случае замены пластинки пружиной, или если бы мы рассматривали взаимодействия тележек при их столкновении.

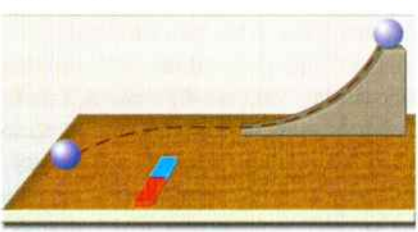
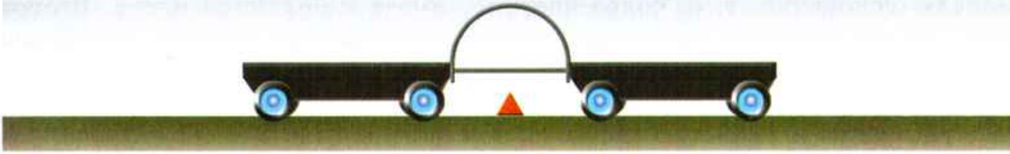
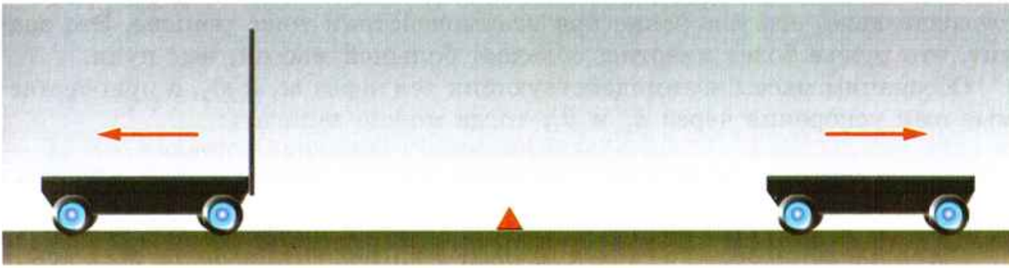


Рис. 52

Инертность. О теле, которое при взаимодействии приобретает меньшее ускорение, т. е. за время взаимодействия меньше изменяет свою скорость, говорят, что оно *более инертно*, чем второе из двух



а



б

Рис. 53

взаимодействующих тел. *Менее инертно* то тело, которое за время взаимодействия больше изменяет свою скорость, т. е. приобретает большее ускорение. Но любому телу для изменения скорости требуется какое-то время. Ни у какого тела, ни при каком взаимодействии скорость не может измениться мгновенно. Это свойство тел называется *инертностью*.

Инертность — свойство, присущее всем телам и состоящее в том, что для изменения скорости тела требуется время.

Вы знаете, что скорость движения трогающихся с места автомобилей и железнодорожных поездов нарастает постепенно.

Многие из вас видели по телевидению (или в кино) запуск космических кораблей. Вы, вероятно, обратили внимание на то, что скорость ракеты-носителя изменяется не рывком, а постепенно.

Постепенно растет и скорость санок (или лыжника) при спуске с горы. Так же постепенно изменяется и скорость тел при торможении: не могут остановиться мгновенно спортсмен на финише, автомобиль на перекрестке, поезд у семафора.

Переходить дорогу перед движущимся транспортом очень опасно, так как вследствие инертности ни машина, ни поезд не могут мгновенно остановиться при торможении. (Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в § 23.)

Масса тел. Свойство тела — инертность — характеризуется физической величиной: *массой*.

То из двух взаимодействующих тел, которое получает меньшее по модулю ускорение, т. е. более инертно, имеет и бо́льшую массу. Второе тело, менее инертное, имеет меньшую массу. Поэтому говорят, что *масса тела — это мера его инертности*.

Например, оттолкнувшись от партнерши, фигурист приобретает меньшее ускорение и меньшую скорость, чем фигуристка. Это свидетельствует о том, что он более инертен, т. е., что его масса больше, чем масса партнерши. При выстреле ружье приобретает меньшую скорость, чем пуля, следовательно, его ускорение при взаимодействии тоже меньше. Это значит, что ружье более инертно, обладает большей массой, чем пуля.

Обозначим массы взаимодействующих тел через m_1 и m_2, а приобретаемые ими ускорения через $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$, тогда можно записать:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (1)$$

Отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс.

В опыте с тележками получилось, что отношение ускорения алюминиевой тележки к ускорению стальной равно 3. Это значит, что масса алюминиевой тележки в три раза меньше массы стальной.

Как измерить массу тела? По формуле (1), если мы измерим ускорения двух тел, взаимодействующих между собой, мы можем найти *отношение* их масс. Но как измерить массу отдельного тела? Очевидно, для этого в качестве второго тела нужно взять эталон единицы массы.

Из 7-го класса вы знаете, что за единицу массы — килограмм — принята масса специально изготовленного цилиндра из сплава платины и иридия.

Проведя опыт, в котором тело с неизвестной массой как-то взаимодействует с эталоном единицы массы, и измерив ускорения, которые они получают, мы сможем записать равенство

$$\frac{a_т}{a_{эт}} = \frac{m_{эт}}{m_т},$$

или

$$m_т = m_{эт}\frac{a_{эт}}{a_т}, \qquad (2)$$

где $m_т$ — масса тела, $m_{эт} = 1$ кг — масса эталона, $a_т$ и $a_{эт}$ — модули ускорений, соответственно тела и эталона.

Но не надо думать, что каждый раз, когда нужно измерить массу какого-нибудь тела, его приводят во взаимодействие с эталоном единицы массы и измеряют ускорения тела и эталона. Существует другой способ измерения массы — взвешивание, с которым вы уже знакомы. Если с помощью весов определить массы алюминиевой и стальной тележек, с которыми мы проводили опыты, то получится такой же результат, как и при измерении ускорений: масса алюминиевой тележки в три раза меньше массы стальной тележки.

Масса входит в число основных физических величин, а ее единица — килограмм — является в СИ основной единицей.

Проверьте себя

1. Что является причиной ускорения тела?
2. Что можно сказать об ускорениях двух взаимодействующих тел?
3. Можно ли мгновенно изменить скорость тела?
4. В чем проявляется свойство инертности тел?
5. Какой величиной характеризуется инертность тела?
6. Как связаны между собой массы взаимодействующих тел и ускорения, возникающие при их взаимодействии?
7. Каким образом может быть измерена масса отдельного тела?

§ 16. Сила. Второй закон Ньютона

Сила. В предыдущем параграфе мы выяснили, что ускорение какого-либо тела всегда вызывается действием на него другого тела, — того, с которым оно взаимодействует. Напомним, что физическую величину, с помощью которой количественно описывают взаимодействие тел, называют *силой*.

В 7-м классе вы познакомились с основными свойствами силы, а также с двумя видами сил — силой тяжести и силой упругости.

Вы узнали, что сила является векторной величиной — она характеризуется числовым значением (модулем) и направлением; что сила тяжести — это сила, действующая на тело со стороны Земли, а сила упругости возникает при растяжении или сжатии тела, например пружины.

Исследуя деформацию сжатия и растяжения, английский ученый Роберт Гук в 1660 году открыл закон, носящий с тех пор его имя.

При небольших деформациях сжатия и растяжения модуль $F_{упр}$ силы упругости прямо пропорционален модулю удлинения x тела.

Удлинение тела — это разность его конечной l и начальной l_0 длины ($x = l - l_0$).

Математически закон Гука записывается так:

$$\boxed{F_{\text{упр}} = k|x|.}$$

Коэффициент пропорциональности k называется *жесткостью* тела.

Второй закон Ньютона. Кроме деформации (изменения формы) тела, действие силы приводит к изменению скорости движения тела, т. е. к появлению ускорения. Выясним, как связана сила, действующая на тело, с возникающим у него ускорением.

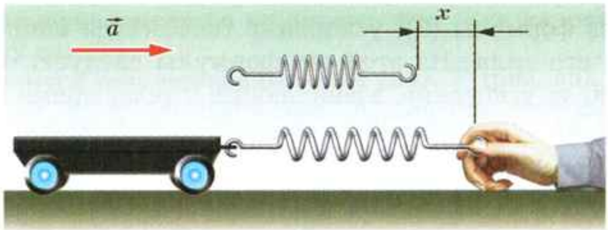
Прикрепим к тележке массой m пружину. Будем перемещать тележку, растягивая пружину на определенную длину (рис. 54, *а*). Обозначим удлинение пружины через x. Растянутая пружина, действуя на тележку с силой упругости, сообщает ей ускорение, которое можно измерить. Пусть модуль ускорения оказался равен a.

Повторим опыт с двумя такими же тележками (рис. 54, *б*). Их общая масса равна $2\ m$. Снова растянем пружину так, чтобы ее удлинение по-прежнему было равно x. Измерим ускорение двух тележек при том же удлинении пружины, т. е. при той же силе упругости. Ускорение двух тележек оказывается равным $\frac{a}{2}$.

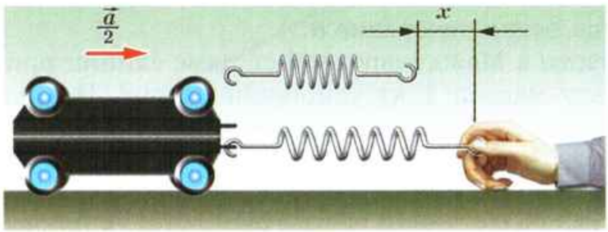
Если провести опыт с тремя, четырьмя тележками при одном и том же удлинении пружины x, (т. е. действуя на тележки одной и той же силой), то ускорение тележек получится, соответственно, равным $\frac{a}{3}$, $\frac{a}{4}$.

Это значит, что во всех случаях произведение массы тележек на их ускорение будет одинаковым и равным ma.

Гук Роберт (1635—1703) — английский ученый, член Лондонского королевского общества. Проводил биологические, географические, геологические исследования и внес значительный вклад в эти науки. Его физические исследования относятся к теплоте, оптике, небесной механике. Гук открыл закон упругости для твердых тел, названный его именем, установил клеточное строение организмов и растений. Предвосхитил закон всемирного тяготения.



а



б

Рис. 54

Эти опыты и многие другие, подобные им, показывают, что если на тела разных масс действует одна и та же сила, то величина, равная произведению массы тела на его ускорение, остается одной и той же.

И. Ньютон сформулировал важный закон движения, который был назван *вторым законом Ньютона*.

Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение.

В математической форме второй закон Ньютона записывается так:

$$\boxed{F = ma.} \qquad (1)$$

Сила и ускорение — векторные величины, поэтому формулу (1) следует записать в векторной форме:

$$\boxed{\vec{F} = m\vec{a}.} \qquad (2)$$

Ускорение, которое сила сообщает телу (материальной точке), определяется формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \qquad (3)$$

Как видно из формулы (3), ускорение тела всегда направлено так же, как вызвавшая его сила. Из этой же формулы следует, что, если масса тела не меняется, то ускорение, возникающее у тела, прямо пропорционально действующей на него силе. Если на тела разной массы действует одна и та же сила, то тело меньшей массы приобретает большее ускорение, т. е. ускорение обратно пропорционально массе тела.

Единица силы. На основе второго закона Ньютона $F = ma$ устанавливается единица силы. Сила F равна единице, если единице равна масса тела m и единице равно ускорение a.

За единицу силы в Международной системе единиц принимается сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2. Эта единица в честь И. Ньютона названа ньютоном (сокращенно: Н):

$$1\ \text{Н} = 1\ \text{кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Брусок массой $m = 2$ кг покоится на горизонтальной идеально гладкой поверхности. С каким ускорением будет двигаться брусок, если к нему приложить силу, направленную горизонтально и равную по модулю $F = 10$ Н?

Решение. Сила сообщает бруску ускорение, направленное так же, как и сама сила. Если направить координатную ось X вдоль направления силы, то проекция a_x вектора $\vec{a}$ будет равна его модулю: $a_x = a$. Проекция F_x вектора $\vec{F}$ тоже равна его модулю: $F_x = F$.

В скалярной форме уравнение второго закона Ньютона имеет вид:

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

откуда

$$a = \frac{10\ \text{Н}}{2\ \text{кг}} = 5\,\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\text{кг}} = 5\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ: $a = 5$ м/с^2.

Проверьте себя

1. Что такое сила?
2. В чем может проявиться действие силы на тело?
3. Как формулируется второй закон Ньютона?
4. Как направлено ускорение тела, если известно направление действующей силы?

5. Тело равномерно движется по окружности. Как направлена приложенная к нему сила?
6. К покоящемуся телу прикладывается сила $\vec{F}$ (рис. 55). Можно ли определить, куда будет двигаться тело? А если тело уже двигалось?

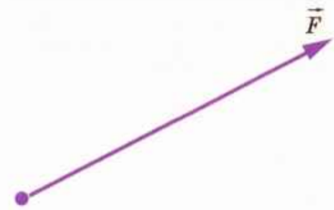


Рис. 55

7. Трамвай массой $6 \cdot 10^3$ кг двигался со скоростью 36 км/ч. При торможении в результате трения он остановился за 5 с. Определите силу трения.

§ 17. Сложение сил

Равнодействующая сила. Тело может взаимодействовать не с одним, а с несколькими телами, значит, на него действуют несколько сил. Например, на тело, висящее на пружине, действуют две силы: сила тяжести и сила упругости.

Как показывают опыты, действующие силы не мешают друг другу: результат действия каждой из них не зависит от результата действия остальных. По этой причине силы, приложенные к телу, можно заменить одной силой. Она деформирует тело и сообщает ему такое же ускорение, как если бы на тело действовали все приложенные силы. Эту силу называют *равнодействующей*.

В формуле второго закона Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$ под $\vec{F}$ надо понимать именно равнодействующую силу, а под ускорением $\vec{a}$ — результирующее ускорение тела.

В общем случае *равнодействующей* называют силу, которая оказывает на тело то же действие, что и несколько сил.

Сложение сил, направленных по одной прямой. Покажем с помощью опытов, как находится равнодействующая сила.

Сначала найдем равнодействующую двух сил, действующих на тело по одной прямой в одну сторону.

К пружине со стрелкой-указателем подвесим груз массой 102 г. Это значит, что на пружину подействует сила 1 Н. Отметим на линейке

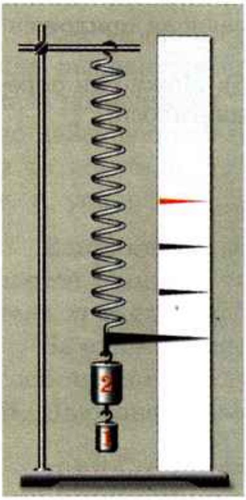


Рис. 56

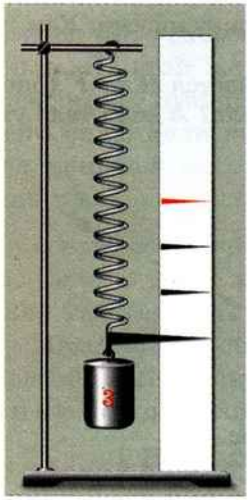


Рис. 57

положение стрелки-указателя. Заменим груз другим, массой 204 г (действующая сила равна 2 Н) и опять отметим положение стрелки-указателя.

Теперь ко второму грузу подвесим первый. Значит, на пружину одновременно действуют две силы, равные 2 Н и 1 Н. Результат их действия отметим по линейке (рис. 56). Снимем эти грузы и подвесим другой (массой 306 г). Стрелка-указатель отмечает, что результат действия силы 3 Н такой же, как и при одновременном действии двух первых сил (рис. 57).

Из этого опыта и других подобных следует вывод: *равнодействующая сил, направленных по одной прямой в одну сторону, направлена в ту же сторону, а ее модуль равен сумме модулей слагаемых сил*: $F = F_1 + F_2$, где F — модуль равнодействующей силы, а F_1 и F_2 — модули слагаемых сил (рис. 58).

Выясним теперь, как найти равнодействующую двух сил, действующих на тело по одной прямой в противоположные стороны. Тело — столик динамометра. Поставим на столик гирю массой 500 г, т. е. подействуем на него силой, приблизительно равной 5 Н (4,9 Н), направленной вниз (рис. 59, *а*). Привяжем к столику нить и подействуем на него с силой, направленной вверх (рис. 59, *б*) и равной 2 Н (значение этой силы показывает верхний динамометр). Мы видим, что теперь круглый динамометр показывает силу 3 Н; эта сила есть равнодействующая двух сил: 5 Н и 2 Н.

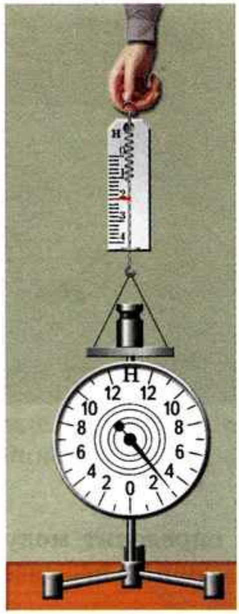
Рис. 58

Следовательно, *равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой в противоположные стороны, направлена в сторону большей по модулю силы, а ее модуль равен разности модулей слагаемых сил:* $F = F_2 - F_1$ (рис. 60).

Сложение сил, направленных под углом друг к другу. Очень часто на тело действуют силы, направленные под углом друг к другу, поэтому следует научиться находить их равнодействующую.

Чтобы найти равнодействующую двух сил, направленных под углом друг к другу, произведем такой опыт.

а



б

Рис. 59

Рис. 60

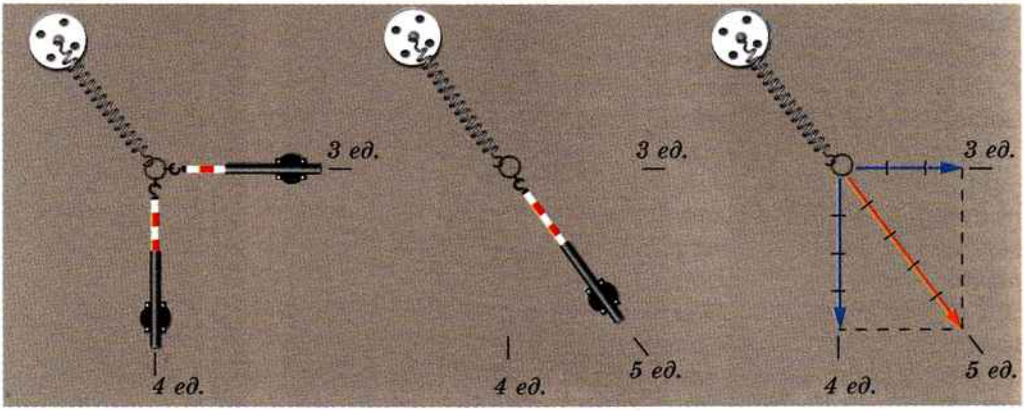
На специальном щите с помощью магнитного держателя укрепим один конец пружины, а другой оттянем двумя динамометрами так, чтобы динамометры располагались под прямым углом и показывали 3 и 4 единицы силы. Отметим точкой положение колечка пружины и с помощью рисок положение динамометров (рис. 61, *а*). Затем один динамометр уберем, а другим оттянем пружину так, чтобы колечко вновь оказалось на поставленной ранее метке. Отметим на щите риской новое положение динамометра и запишем его показание (рис. 61, *б*).

Уберем динамометр и проведем из точки, указывающей положение колечка пружины, прямые через три риски. На этих прямых в произвольном, но одинаковом масштабе построим три вектора силы (рис. 61, *в*).

Соединив концы векторов, мы получим четырехугольник (прямоугольник), в котором диагональ представляет собой равнодействующую силу.

В нашем опыте угол между слагаемыми силами был равен 90°. Можно угол взять произвольным. При этом значение равнодействующей изменяется, но, как показывают опыты, способ сложения сил остается прежним.

Для нахождения равнодействующей двух сил, действующих под углом друг к другу, надо построить параллелограмм на этих силах, как на сторонах, и провести в нем из точки приложения сил диагональ. Длина



а б в

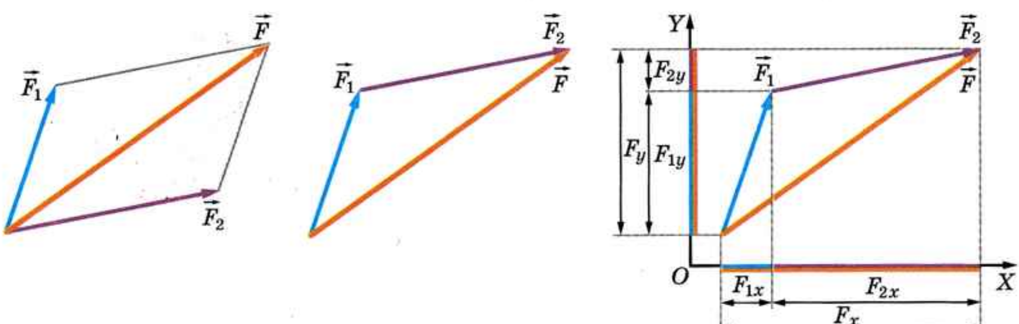
Рис. 61

и направление этой диагонали определят модуль и направление равнодействующей (рис. 62, *а*). Это правило называется *правилом параллелограмма*.

Тот же результат получится, если сложение векторов осуществить так: с концом вектора $\vec{F}_1$ совместить начало вектора $\vec{F}_2$ и соединить начало первого вектора с концом второго (рис. 62, *б*). Это правило называется *правилом треугольника*.

Сложение сил записывается так:

$$\boxed{\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.} \qquad (1)$$



а б в

Рис. 62

*Мы знаем, что от формул, записанных в векторном виде, нужно уметь переходить к формулам, записанным для проекций, так как в векторные формулы числовые значения величин подставлять нельзя. Сделаем это для равенства (1).

Из рисунка 62, *в* непосредственно видно, что

$$F_x = F_{1x} + F_{2x}, \tag{2}$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y}, \tag{3}$$

где F_x и F_y — проекции равнодействующей силы на координатные оси OX и OY, а F_{1x}, F_{2x}, F_{1y}, F_{2y} — проекции слагаемых сил на те же оси.

Опыты показывают, что уравнения (2), (3) справедливы не только для сил, но и для других векторов — перемещений, скоростей, ускорений. Поэтому в общем виде правило формулируется так: *проекции суммарного вектора на координатные оси равны сумме проекций слагаемых векторов.**

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На тело массой $m = 2$ кг действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, направленные в противоположные стороны. Модули сил, соответственно, равны: $F_1 = 10$ Н и $F_2 = 14$ Н. Чему равен модуль ускорения тела? Как направлен вектор ускорения?

Решение. По второму закону Ньютона $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$. Здесь $\vec{F}$ — равнодействующая сил, действующих на тело; она направлена в сторону большей силы, т. е. силы $\vec{F}_2$, и ее модуль равен разности модулей сил $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1$.

Вектор ускорения $\vec{a}$ направлен так же, как и равнодействующая $\vec{F}$, т. е. в направлении большей силы $\vec{F}_2$.

Направив координатную ось OX вдоль направления силы $\vec{F}_2$ и выразив проекцию ускорения $\vec{a}$ через модуль вектора: $a_x = a$, запишем второй закон Ньютона в виде:

$$a = \frac{F_2 - F_1}{m},$$

откуда

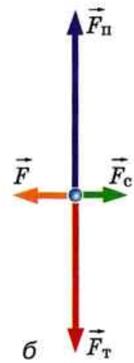
$$a = \frac{4\ \text{Н}}{2\ \text{кг}} = \frac{4\ \dfrac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}}{2\ \text{кг}} = 2\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ: вектор ускорения $\vec{a}$ направлен по направлению силы $\vec{F}_2$; модуль ускорения равен 2 м/с^2.

Проверьте себя

1. Какую силу называют равнодействующей нескольких сил?
2. Как формулируется второй закон Ньютона, если на тело действует несколько сил?
3. Чему равна равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой в одну сторону?
4. Может ли равнодействующая двух одинаковых по модулю сил быть равной нулю?
5. Как будет двигаться тело под действием двух равных по модулю, противоположно направленных сил?
6. Как находят равнодействующую двух сил, направленных под углом друг к другу?

а



б

Рис. 63

*7. На самолет (рис. 63, *а*) в вертикальном направлении действуют сила тяжести $\vec{F}_т$ и подъемная сила $\vec{F}_п$, а в горизонтальном направлении — сила тяги $\vec{F}$ и сила сопротивления воздуха $\vec{F}_с$ (рис. 63, *б*). Модули этих сил, соответственно, равны 545, 550, 162 и 150 кН. Найдите равнодействующую (по модулю и направлению).

§ 18. Третий закон Ньютона

Законы Ньютона взаимосвязаны. Их содержание, глубокий физический смысл можно понять только в том случае, когда хорошо усвоена взаимная связь этих законов.

Первый закон отвечает на вопрос: как будет двигаться тело, на которое не действуют силы или действия этих сил взаимно компенсируют друг

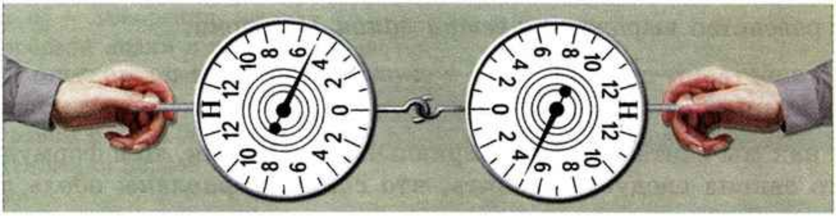


Рис. 64

друга. Как вы знаете, ответ заключается в том, что такое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения.

Второй закон развивает сказанное в первом законе, отвечая на вопрос: как будет двигаться тело, к которому приложена сила, действие которой не скомпенсировано. Ответ таков: тело приобретает такое ускорение, что его произведение на массу тела равно действующей на тело силе, а направление ускорения совпадает с направлением этой силы.

Однако не бывает действия тела самого на себя. Когда говорят о действии на тело силы, всегда подразумевают существование второго тела, которое и является причиной возникновения силы.

Но ни первый, ни второй закон не говорит о том, что происходит со вторым из двух взаимодействующих тел. Выясним это с помощью опыта.

Соединим крючки двух динамометров (рис. 64). Растягивая их, мы увидим, что стрелки динамометров отклоняются на одинаковое число делений, но в противоположные стороны. Это означает, что силы, с которыми динамометры действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

В § 15 вы узнали, что отношение модулей ускорений взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс: $\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$, или $m_1a_1 = m_2a_2$. Там же мы обратили внимание на то, что ускорения обоих тел направлены в противоположные стороны. Математически это записывается в таком виде:

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2.$$

Но произведение массы тела на его ускорение, как вы теперь знаете, равно действующей на тело силе. Это значит, что $m_1\vec{a}_1$ равно силе $\vec{F}_1$, действующей на первое тело со стороны второго, а $m_2\vec{a}_2$ равно силе $\vec{F}_2$, действующей на второе тело со стороны первого. Следовательно,

$$\boxed{\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.}$$

Это равенство выражает *третий закон Ньютона*:

Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.

Так как мы считаем тела материальными точками, то в формулировку третьего закона следует добавить, что *силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти точки*.

Ньютон сформулировал закон следующим образом:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — действия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.

Этот закон отражает тот факт, что в природе нет и не может быть одностороннего действия одного тела на другое, а существует лишь взаимодействие. Силы действия и противодействия появляются одновременно, парами. Иногда эту мысль выражают так: нет действия без противодействия. Следует при этом иметь в виду, что термины «действие» и «противодействие» условны: их можно поменять местами.

Важно подчеркнуть, что силы взаимодействия хотя и равны и противоположно направлены, но не компенсируют друг друга, так как приложены к разным телам. Например, когда человек идет по Земле, то сила, с которой он отталкивает Землю, равна той силе, с которой его толкает вперед Земля. Однако эти силы не компенсируются, они сообщают человеку и Земле ускорения, обратно пропорциональные их массам. Земля благодаря ее очень большой сравнительно с человеком массе остается при этом практически неподвижной, а человек движется.

Третий закон Ньютона позволяет также определить, сколько сил действует на тело. Число этих сил всегда равно числу тел, с которыми взаимодействует данное тело. Нельзя утверждать, что на тело действует сила, если не удается найти второе тело, со стороны которого эта сила действует. Если же второе тело найдено, то на него со стороны первого тела должна действовать такая же по модулю сила вдоль прямой, соединяющей тела.

*ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Человек, сидя в лодке на озере, начинает подтягивать к себе с помощью веревки вторую лодку (рис. 65, *а*). Какие расстояния пройдут лодки за 10 с, если масса первой из них (вместе с человеком) $m_1 = 250$ кг, а второй — $m_2 = 200$ кг? Человек тянет веревку с силой, равной по модулю $F = 100$ Н. (Сопротивление воды движению лодок не учитывать.)

Решение. Считаем, что лодки в начальный момент в системе отсчета, связанной с водой, были неподвижны.

Запишем уравнения для перемещений лодок:

$$\vec{s}_1 = \frac{\vec{a}_1 t^2}{2}, \quad \vec{s}_2 = \frac{\vec{a}_2 t^2}{2},$$

где $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ — ускорения, которые приобрели лодки в результате взаимодействия (рис. 65, *б*), t — заданное время движения.

Направим ось OX в направлении движения первой лодки.

Тогда

$$s_{1x} = s_1,\ a_{1x} = a_1,\ s_{2x} = -s_2,\ a_{2x} = -a_2$$

и уравнения для модулей перемещений примут вид:

$$s_1 = \frac{a_1 t^2}{2},\quad s_2 = \frac{a_2 t^2}{2}. \qquad (1)$$

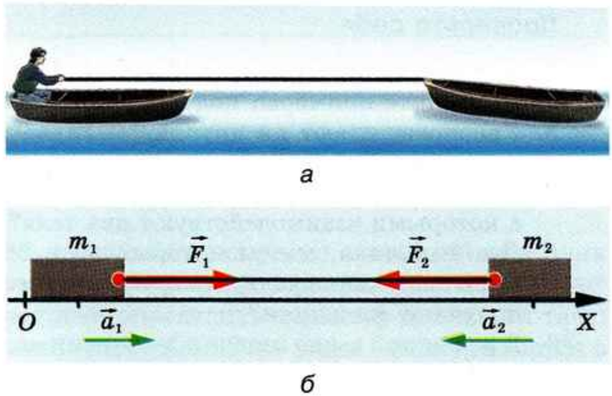


Рис. 65

Для нахождения ускорений воспользуемся вторым законом Ньютона:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m_1},\ \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m_2},$$

где $\vec{F}_1$ — сила, с которой вторая лодка (через веревку) действует на первую; $\vec{F}_2$ — сила, с которой человек (через веревку) действует на вторую лодку (см. рис. 65, *б*).

Согласно третьему закону Ньютона эти силы равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2,\quad F_1 = F_2 = F.$$

Запишем уравнение для ускорений в скалярном виде:

$$a_1 = \frac{F_1}{m_1} = \frac{F}{m_1},\ a_2 = \frac{F_2}{m_2} = \frac{F}{m_2}. \qquad (2)$$

Подставив эти выражения для ускорений в формулы (1), получим:

$$s_1 = \frac{Ft^2}{2m_1},\ s_2 = \frac{Ft^2}{2m_2}.$$

Произведем вычисления:

$$s_1 = \frac{100\ \text{Н} \cdot 100\ \text{с}^2}{2 \cdot 250\ \text{кг}} = \frac{100\ \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{100\ \text{с}^2}{2 \cdot 250\ \text{кг}} = 20\ \text{м};$$

$$s_2 = \frac{100\ \text{Н} \cdot 100\ \text{с}^2}{2 \cdot 200\ \text{кг}} = \frac{100\ \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{100\ \text{с}^2}{2 \cdot 200\ \text{кг}} = 25\ \text{м}.$$

Ответ: $s_1 = 20$ м; $s_2 = 25$ м.*

Проверьте себя

1. Как формулируется третий закон Ньютона?
2. Приведите примеры, подтверждающие третий закон Ньютона.
3. Уравновешивают ли друг друга силы, которые возникают при взаимодействии двух тел?
*4. Можно ли, опираясь только на третий закон Ньютона, определить силы, с которыми взаимодействуют два тела?
5. Два мальчика, массы которых 40 и 50 кг, стоят на коньках на льду. Один мальчик отталкивается от другого с силой 10 Н. Какие ускорения получают мальчики?
*6. В решенной выше задаче о движении лодок определите время, через которое они встретятся, если вначале лодки находились на расстоянии 54 м.

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 5

1. Опыты и наблюдения показывают, что причиной изменения движения тел, т. е. причиной изменения их скорости, являются воздействия на них других тел. Количественно действие одного тела на другое, вызывающее изменение скорости, т. е. появление ускорения, выражается величиной, называемой силой. Сила — векторная величина.

2. Действие одного тела на другое не одностороннее. Тела взаимодействуют. Ускорения, которые получают тела при данном взаимодействии, зависят от особого свойства всякого тела — его инертности. Количественно это свойство выражается величиной, называемой массой. Сравнить массы тел можно по ускорениям, приобретаемым телами при их взаимодействии.

3. Ньютон обобщил все знания о механическом движении, известные до него, свел их в единую внутренне согласованную систему и показал, что все механические явления могут быть объяснены с помощью сформулированных им законов. Таким образом, Ньютону принадлежит заслуга создания первой теории механических явлений.

4. Первый закон Ньютона утверждает, что всякое тело сохраняет свое первоначальное состояние относительного покоя или прямолинейного равномерного движения, пока на него не подействуют другие тела и не изменят это состояние.

5. Второй закон Ньютона устанавливает связь между силой, массой и ускорением: сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

6. Третий закон Ньютона описывает взаимодействие двух тел: силы, с которыми тела действуют друг на друга, всегда равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

глава 6

СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

В предыдущих главах вы познакомились со способами описания простейших движений — равномерного и равноускоренного, а также с тремя законами Ньютона, позволяющими определить характер движения тела, если известны действующие на него силы. Какие же виды сил встречаются в природе? Оказывается, в механике, которую мы изучаем, имеют дело с тремя видами сил: силой упругости, силой тяготения и силой трения. С силой упругости вы уже знакомы. В этой главе вы узнаете о двух других силах.

§ 19. Сила всемирного тяготения

Закон всемирного тяготения. Мы уже много раз говорили о том, что со стороны Земли на все тела действует сила притяжения. Под действием этой силы поднятые тела, если их отпустить, падают на поверхность Земли с ускорением. Но тела притягиваются не только к Земле, но и друг к другу. В этом можно убедиться на следующем (очень простом по идее и сложном по постановке) опыте. К легкому стержню прикрепляют шарики *1* (рис. 66). Стержень подвешивают на прочной нити. Если к шарикам *1* приближать массивные шары *2*, то стержень поворачивается, закручивая нить. Это и означает, что массивные шары притягивают к себе более легкие маленькие шарики.

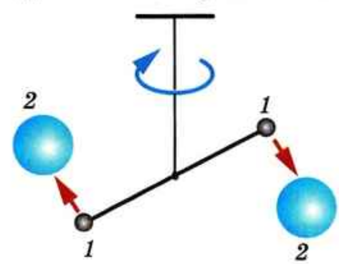


Рис. 66

В 1687 году, анализируя материалы астрономических наблюдений, Ньютон применил сформулированные им законы динамики к движению Луны. Ему было известно, что Луна обращается вокруг Земли почти по круговой орбите (рис. 67). Но движение по круговой орбите возможно только тогда, когда на тело действует какая-то сила, сообщающая ему центростремительное ускорение. Если бы такой силы не было, Луна двигалась бы

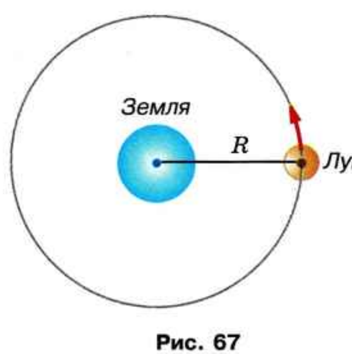


Рис. 67

прямолинейно и равномерно. Ньютон высказал предположение, что этой силой является сила взаимного притяжения Луны и Земли. Произведя необходимые расчеты, он пришел к выводу, что силу взаимного притяжения Луны и Земли можно вычислить по формуле

$$\boxed{F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},}$$

где m_1 и m_2 — массы Луны и Земли; R — расстояние между ними; G — коэффициент пропорциональности, называемый *гравитационной*[1] постоянной.

Ньютон не остановился на этом и доказал, что по полученной им формуле можно рассчитать силу притяжения любых тел (гравитационную силу), если их размеры малы по сравнению с расстоянием между ними. Поэтому открытый им закон получил название *закона всемирного тяготения*.

Закон всемирного тяготения формулируется следующим образом:

Тела (материальные точки) притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.

В формулировке закона в скобках указано «материальные точки». Это означает, что закон справедлив лишь тогда, когда геометрические размеры тел малы по сравнению с расстоянием между ними и их можно принять за материальные точки. Однако закон справедлив и для однородных шаров, находящихся на произвольных и в том числе на небольших расстояниях друг от друга. В этом случае силы действуют вдоль линии, соединяющей центры шаров, R — расстояние между центрами.

Гравитационная постоянная. В формулу закона всемирного тяготения входит гравитационная постоянная, или *постоянная тяготения*. Выясним ее физический смысл. Для этого выразим ее через величины, входящие в формулу закона:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

откуда

$$G = \frac{FR^2}{m_1 m_2}.$$

Допустим, что на расстоянии 1 м находятся две материальные точки массой по 1 кг каждая, тогда G будет численно равно F. *Гравитационная*

[1] От латинского слова *gravitas* — «тяготение, тяжесть».

постоянная численно равна силе притяжения двух материальных точек массой 1 кг *каждая, находящихся на расстоянии* 1 м *друг от друга.*

Из этого же выражения для G видно, что единицей гравитационной постоянной является 1 Н · м^2/кг^2.

Числовое значение гравитационной постоянной может быть найдено из опыта. Существуют несколько способов его нахождения. Все они состоят в измерении силы притяжения двух тел известной массы при известном расстоянии между ними.

Измерения дали такой результат:

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Так как гравитационная постоянная очень мала, мы не замечаем притяжения обычных тел, окружающих нас. Расчеты показывают, что два шара массой 1 т каждый, находящиеся на расстоянии 1 м один от другого, притягиваются друг к другу с силой, примерно равной 0,00007 Н.

Гравитационная постоянная универсальна: ее значение одинаково как на Земле, так и в просторах Вселенной.

***Расчет массы космических тел.** Пользуясь законом всемирного тяготения, можно определять массы космических тел. Оценим, например, массу Солнца. Земля движется вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Расстояние от Земли до Солнца 150 млн км. Центростремительное ускорение Земли при ее движении вокруг Солнца равно

$$a = \frac{v^2}{R};\ \ a = \frac{\left(3 \cdot 10^4\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{1{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{м}} = 0{,}006\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Это же ускорение мы можем найти, воспользовавшись законом всемирного тяготения и вторым законом Ньютона:

$$a = \frac{F}{m_З} = G\frac{m_З M_С}{R^2 m_З} = G\frac{M_С}{R^2}.$$

Рассчитаем массу Солнца:

$$M_С = \frac{aR^2}{G} = \frac{0{,}006\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (1{,}5 \cdot 10^{11})^2 \text{м}^2}{6{,}7 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} =$$

$$= \frac{0{,}006 \cdot 1{,}5^2 \cdot 10^{11} \cdot 10^{11}}{6{,}7 \cdot 10^{-11}}\ \text{кг} = 2 \cdot 10^{30}\ \text{кг.}*$$

Проверьте себя

1. От каких физических величин зависит сила всемирного тяготения?
2. Как изменится сила притяжения между двумя телами, если одно из них заменить другим, масса которого втрое больше?
3. Как изменится сила притяжения между двумя шарами, если расстояние между их центрами увеличить в три раза?
4. Вычислите силу притяжения Луны к Земле. Масса Луны равна $7{,}4 \cdot 10^{22}$ кг, масса Земли — $6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг, расстояние между центрами этих тел составляет $3{,}8 \cdot 10^{8}$ м.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Световые лучи, идущие от звезд, при прохождении вблизи массивных небесных тел (звезд, планет), испытывают гравитационное притяжение. Впервые угол отклонения траектории световых лучей от прямолинейной вблизи Солнца экспериментально измерил в 1919 году английский астроном А. Эддингтон при наблюдении полного солнечного затмения. Он оказался близким к значению 1,75″, полученному путем расчетов.

§ 20. Сила тяжести

Сила тяжести. Одно из проявлений силы всемирного тяготения — сила притяжения тела к Земле. Эту силу, как вы знаете, называют *силой тяжести*. Согласно закону всемирного тяготения она выражается формулой:

$$\boxed{F_{т} = G\frac{mM_{з}}{R^2},} \qquad (1)$$

где m — масса тела, $M_{з}$ — масса Земли. Сила тяжести направлена к центру Земли.

Если тело расположено на поверхности Земли или близко от нее, то R в формуле (1) — это радиус Земли $R_{з}$.

Центр тяжести. Сила тяжести действует на все тела. Но к какой точке приложена эта сила, если тело нельзя считать материальной точкой? Проще всего ответить на этот вопрос опытным путем.

Возьмем тело произвольной формы, изготовленное из фанеры. Подвесим его с помощью нити, один конец которой закрепим в точке вне тела, а другой — на теле в точке A (рис. 68, a).

На тело действуют сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$.

Под действием этих сил тело находится в равновесии. Поэтому, согласно второму закону Ньютона, $\vec{F}_т + \vec{F}_{упр} = 0$.

Отсюда следует, что

$$\vec{F}_т = -\vec{F}_{упр},$$

т. е. сила тяжести и сила упругости направлены противоположно и линии их действия лежат на одной прямой. Эта прямая вертикальна и проходит через точку A. Проведем эту прямую. Повторим опыт, прикрепив второй конец нити к другой точке (B) на теле, и найдем новую линию действия силы тяжести (рис. 68, *б*). Проведенные линии действия силы тяжести пересекаются в одной точке O. Если подвесить тело в какой-то третьей точке, то линия действия силы тяжести опять пройдет через точку O. Эта точка и есть центр тяжести тела.

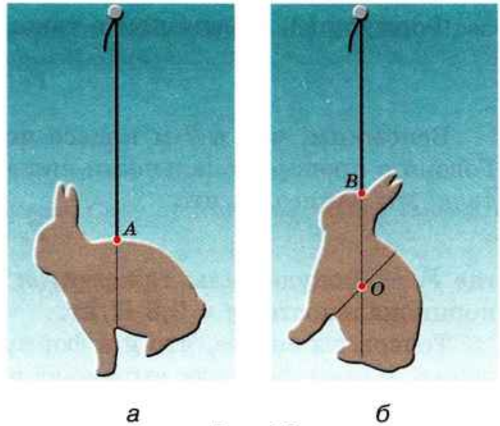


Рис. 68

Точку приложения силы тяжести, действующей на тело, при любом его положении в пространстве называют *центром тяжести*.

Ускорение свободного падения. Сила тяжести сообщает телу ускорение, которое в § 11 мы назвали ускорением свободного падения и обозначили буквой g. В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_т}{m}. \quad (2)$$

С учетом выражения (1) для модуля ускорения свободного падения будем иметь:

$$\boxed{g = G\frac{M_з}{R_з^2}.} \quad (3)$$

С помощью именно этой формулы английскому ученому Г. Кавендишу, измерившему гравитационную постоянную, впервые удалось оценить массу Земли. Поэтому говорят, что Кавендиш «взвесил» Землю.

Из формулы (3) видно, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела и, следовательно, одинаково для всех тел. Расчеты и измерения показывают, что модуль ускорения свободного падения равен примерно 9,8 м/с^2.

Формулу (2) перепишем в таком виде:

$$\vec{F}_т = m\vec{g}. \quad (4)$$

Вспомним, что в 7-м классе похожее соотношение нам встречалось. Говоря о пропорциональности силы тяжести, действующей на тело, массе тела, мы записали, что

$$F_т = gm, \quad (5)$$

где $F_т$ — модуль силы тяжести, m — масса тела, g — коэффициент пропорциональности; $g = 9{,}8$ Н/кг.

Теперь вы знаете, что g в формуле (5) — это ускорение свободного падения, а сама формула выражает второй закон Ньютона.

С помощью формулы (3) можно рассчитать ускорение свободного падения не только на поверхности Земли, но и на поверхности любой планеты Солнечной системы, а также Луны. Для этого вместо массы Земли $M_З$ и ее радиуса $R_З$ в нее надо подставить соответствующую массу и радиус небесного тела.

В таблице 3 приведены значения ускорения свободного падения на поверхности некоторых планет.

Таблица 3

Планета	g, м/с^2	Планета	g, м/с^2
Венера	8,9	Юпитер	26
Марс	3,9	Сатурн	12

*Если тело находится не на поверхности Земли, а на высоте h над ней, то ускорение свободного падения определяется не равенством (3), а равенством

$$g_h = G\frac{M_З}{(R_З + h)^2}.$$

Из этой формулы видно, что с ростом высоты h ускорение свободного падения должно уменьшаться. Так, на высоте 300 км от поверхности Земли ускорение свободного падения уменьшается на 1 м/с^2. При высотах в десятки, сотни и даже тысячи метров над Землей ускорение свободного падения можно считать постоянным. Поэтому свободное падение тел вблизи Земли считают равноускоренным движением.

И все же у поверхности Земли ускорение свободного падения не везде одинаково. Оно зависит от географической широты: больше на полюсах Земли, чем на экваторе. Дело в том, что земной шар несколько сплюснут у полюсов. Экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 км.

Другой причиной зависимости ускорения свободного падения от географической широты является вращение Земли.*

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Рассчитайте массу Земли, если известно, что ее радиус равен $6{,}37 \cdot 10^6$ м.

Решение. Все тела притягиваются к Земле. Силу притяжения можно выразить двумя способами:

$$F_т = mg \text{ и } F_т = G\frac{mM_З}{R_З^2}.$$

Приравняем правые части этих равенств:

$$mg = G\frac{mM_З}{R_З^2}.$$

Откуда

$$M_З = \frac{gR_З^2}{G}.$$

Подстановка числовых данных приводит к следующему результату:

$$M_З = \frac{9{,}8\ \frac{м}{с^2} \cdot 637^2 \cdot 10^8\ м^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}} = \frac{9{,}8 \cdot 405\,769 \cdot 10^{19}}{6{,}67}\ кг \approx 5{,}98 \cdot 10^{24}\ кг.$$

Ответ: $M_З \approx 6 \cdot 10^{24}$ кг.

2. Рассчитайте ускорение свободного падения на поверхности Луны. Масса Луны равна $7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг, ее радиус — $1{,}74 \cdot 10^6$ м.

Решение. Воспользуемся формулой (3):

$$g_Л = G\frac{M_Л}{R_Л^2}.$$

Подставив числовые значения величин, получим:

$$g_Л = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Н \cdot м^2}{кг^2} \cdot \frac{7{,}35 \cdot 10^{22}\ кг}{(1{,}74 \cdot 10^6\ м)^2} \approx 1{,}6\ \frac{м}{с^2}.$$

Ответ: $g_Л \approx 1{,}6$ м/с^2, что в 6 раз меньше ускорения свободного падения на поверхности Земли.

Проверьте себя

1. Что такое сила тяжести?
2. Какое движение называют свободным падением?
3. На основании какого закона можно утверждать, что сила тяжести пропорциональна массе тела?

4. Почему ускорение, которое сила тяжести сообщает телу, не зависит от его массы?
5. Докажите, что 9,8 Н/кг = 9,8 м/с^2.
6. Что такое центр тяжести?
7. Как находят центр тяжести опытным путем?
8. Почему с увеличением высоты над поверхностью Земли ускорение свободного падения уменьшается?
9. Вычислите ускорение свободного падения тел вблизи поверхности Марса. Масса Марса равна $6{,}4 \cdot 10^{23}$ кг, его радиус 3300 км.
10. Какие величины нужно знать, чтобы определить массу планеты Венера?
11. Почему говорят, что Г. Кавендиш «взвесил» Землю?

§ 21. Искусственные спутники Земли

Запуски искусственных спутников Земли и космических кораблей в настоящее время стали привычными. С помощью спутников, первый из которых был запущен в нашей стране 4 октября 1957 года, решается множество научных и народнохозяйственных задач. Научные исследования околоземного пространства и астрономические наблюдения, связь (радио, телевидение) и навигация, служба погоды и изучение природных ресурсов Земли, получение чистых материалов и лекарственных препаратов — вот далеко не полный перечень полезных работ, выполняемых искусственными спутниками Земли.

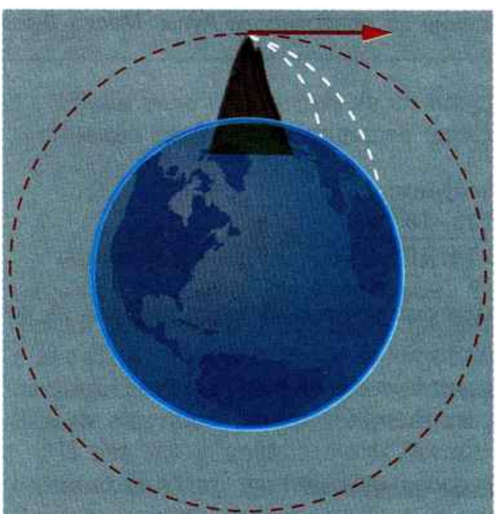


Рис. 69

Как же осуществляются запуски искусственных спутников и космических кораблей? На этот вопрос можно ответить, применив законы динамики.

Будем рассуждать так, как рассуждал И. Ньютон. Камень, брошенный с высокой горы в горизонтальном направлении (рис. 69), под действием силы тяжести движется по криволинейной траектории и падает на Землю (так движется тело, оторвавшееся от горизонтально летящего самолета). Если камень бросить с большей скоростью, то он упадет дальше. Можно предположить, что в безвоздушном пространстве при сообщении камню достаточно большой скорости он вообще никогда не достигнет поверхности Земли, а начнет двигаться вокруг нее по круговой траектории, т. е. станет искусственным спутником Земли.

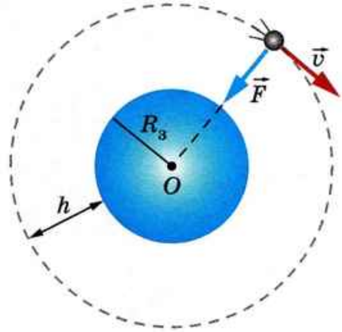


Рис. 70

Вычислим эту скорость. На спутник действует только сила притяжения к Земле $\vec{F}$, направленная к центру Земли (рис. 70) и равная

$$F = G\frac{M_з m}{(R_з + h)^2}, \quad (1)$$

где $M_з$ — масса Земли, m — масса спутника, $R_з$ — радиус Земли, h — высота спутника над поверхностью Земли.

Эта сила сообщает спутнику центростремительное ускорение:

$$a = \frac{v^2}{R_з + h}. \quad (2)$$

По второму закону Ньютона

$$a = \frac{F}{m} = G\frac{M_з}{(R_з + h)^2}.$$

Следовательно,

$$\frac{v^2}{R_з + h} = G\frac{M_з}{(R_з + h)^2}.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{G\frac{M_з}{R_з + h}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что скорость, которую надо сообщить телу в горизонтальном направлении на высоте h, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, не зависит от массы тела. Значит, спутником Земли может стать любое тело, лишь бы ему была сообщена достаточная скорость. Скорость, вычисляемую по формуле (3), называют *первой космической скоростью*.

Первую космическую скорость v_1 для Земли у ее поверхности можно найти, пользуясь формулой (3), если принять $h = 0$:

$$v_1 = \sqrt{G\frac{M_з}{R_з}}. \quad (4)$$

Из формулы (3) предыдущего параграфа следует, что

$$GM_з = gR_з^2.$$

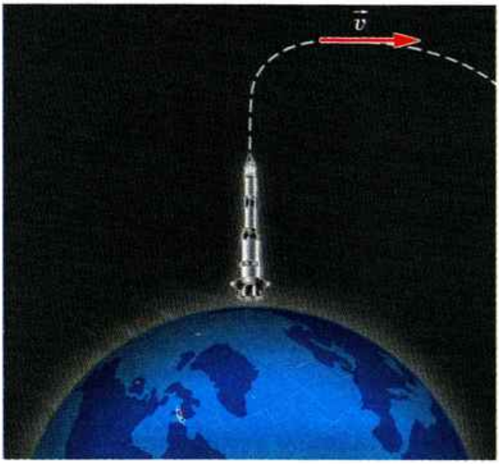


Рис. 71

С учетом этого равенства формула (4) примет такой вид:

$$v_1 = \sqrt{gR_З}.$$

Так как $g \approx 9,8$ м/с^2, а $R_З \approx 6,4 \cdot 10^6$ м, то первая космическая скорость для Земли вблизи ее поверхности оказывается равной $v_1 \approx 8$ км/с.

Такую скорость в горизонтальном направлении нужно сообщить телу на небольшой, сравнительно с радиусом Земли высоте, чтобы оно стало ее спутником, движущимся по круговой траектории. Но когда мы на экране телевизора наблюдаем старт ракеты, выводящей спутник на орбиту, мы видим, что скорость ракеты вертикальна. В чем же дело? Оказывается, наиболее экономично вначале запускать ракету в вертикальном направлении, а затем изменять направление движения (рис. 71), чтобы на расчетной высоте вектор скорости был направлен перпендикулярно радиусу окружности, по которой должен обращаться спутник.

Проверьте себя

1. Зависит ли скорость движения спутника от его массы?
2. Как направлены скорость и ускорение спутника, движущегося по круговой орбите?
3. Какую скорость называют первой космической?
4. Ракете сообщили скорость, направленную вертикально вверх, модуль скорости равен 8 км/с. Станет ли она спутником Земли?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

- Чтобы тело смогло покинуть Землю и превратиться в искусственную планету — спутник Солнца, ему должна быть сообщена так называемая *вторая космическая скорость*. При этой скорости тело выходит за пределы земного притяжения.

Вторая космическая скорость впервые была достигнута при запуске первой ракеты в сторону Луны 2 января 1959 года. Вторая космическая скорость (у поверхности Земли) равна 11,2 км/с.

- *Третья космическая скорость* — скорость, необходимая для того, чтобы тело могло покинуть пределы Солнечной системы и уйти в Галактику. При этой скорости тело выходит из сферы притяжения Солнца и покидает Солнечную систему. Третья космическая скорость (у поверхности Земли) равна 16,7 км/с.

Развив скорость такого порядка, автоматическая межпланетная станция «Пионер-10», запущенная в США 2 марта 1972 года, вышла в 1983 году за пределы Солнечной системы и сейчас летит по направлению к звезде Барнарда.

§ 22. Вес тела. Перегрузка и невесомость

Вес тела. Пусть тело находится на горизонтальной опоре. На тело действует сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$ со стороны деформированной опоры. Обе силы приложены к телу (рис. 72, *а*).

Но прогибается не только опора. Само тело, придавленное к опоре вследствие действия силы тяжести, тоже деформируется, особенно сильно — в своей нижней части. Эта деформация и приводит к появлению силы упругости $\vec{P}$, действующей со стороны тела на опору (см. рис. 72, *а*).

Силы $\vec{F}_{упр}$ и $\vec{P}$ — это силы взаимодействия тела и опоры, поэтому в соответствии с третьим законом Ньютона они равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_{упр} = -\vec{P}.$$

Если тело подвешено, то подвес (нить, веревка, пружина и т. п.) растягивается. В подвесе, как и в опоре, возникает сила упругости $\vec{F}_{упр}$, действующая на тело вертикально вверх (рис. 72, *б*). В свою очередь, деформируется и подвешенное тело, особенно сильно — его верхняя часть. Из-за деформации тела возникает сила упругости $\vec{P}$, которая приложена к подвесу и растягивает его (см. рис. 72, *б*). И здесь силы $\vec{F}_{упр}$ и $\vec{P}$ — это силы взаимодействия тела и опоры, поэтому $\vec{F}_{упр} = -\vec{P}$.

Силу упругости $\vec{P}$, с которой деформированное тело действует на горизонтальную опору или на вертикальный подвес, препятствующие его свободному падению, называют *весом тела*. Вес тела приложен соответственно к опоре или к подвесу, направлен вертикально вниз.

*Обратите внимание, что природа силы тяжести и веса различна. Сила тяжести — это гравитационная сила, приложенная к телу. Вес тела — это сила упругости, образующаяся вследствие деформации тела и приложенная к опоре или к подвесу.

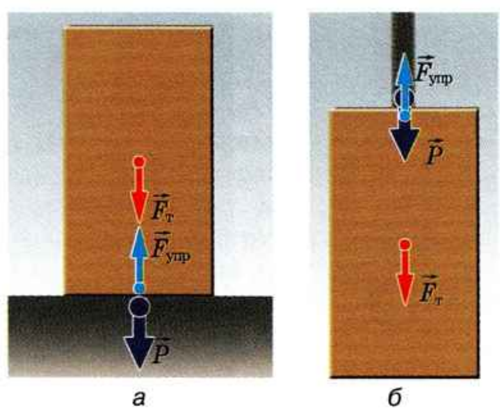


Рис. 72

Заметим, что возникновение деформаций как тела, так и опоры, а, значит, и возникновение сил $\vec{F}_{упр}$ и $\vec{P}$ обусловлено земным притяжением.*

Найдем значение веса тела. Если тело и опора (или подвес) неподвижны относительно Земли или совместно движутся равномерно и прямолинейно, т. е. без ускорения, то, согласно второму закону Ньютона, сумма сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\vec{F}_{упр} + \vec{F}_{т} = 0. \tag{1}$$

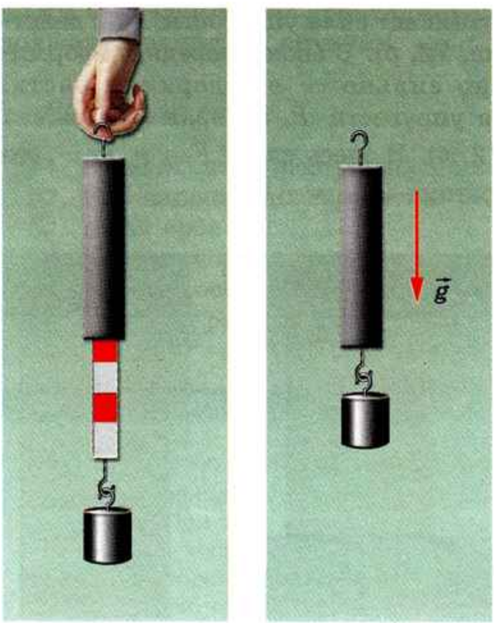
Так как $\vec{F}_{упр} = -\vec{P}$, то $-\vec{P} + \vec{F}_{т} = 0$.

Следовательно,

$$\vec{P} = \vec{F}_{т} = m\vec{g}. \tag{2}$$

Значит, если ускорение равно нулю, то вес тела равен действующей на него силе тяжести. Однако в других условиях это равенство может нарушаться.

Невесомость. Из телевизионных передач или кинофильмов вы знаете, что на космической станции, движущейся вокруг Земли, тела находятся в состоянии, называемом *невесомостью*.



а *б*

Рис. 73

Космонавт, как и все другие тела, может свободно парить на космической станции. В этом случае он не давит на опору и его вес равен нулю. Но на космическую станцию и на все тела, находящиеся в ней, сила тяжести действует по-прежнему.

Подвесим к пружине трубчатого покоящегося динамометра груз (рис. 73, *а*). По шкале прибора определим вес груза. Представим себе, что динамометр выпустили из рук, и он вместе с грузом совершает свободное падение. Деформация пружины исчезает, прибор показывает, что вес тела стал равным нулю (рис. 73, *б*). При свободном падении и динамометр, и груз движутся с одинаковым ускорением, равным ускорению свободного падения. Груз находится в состоянии невесомости.

Этот результат мы можем обосновать, применив законы динамики. Согласно второму закону Ньютона, при движении тела с ускорением $\vec{a}$

$$\vec{F}_{упр} + \vec{F}_{т} = m\vec{a}, \qquad (3)$$

где $\vec{F}_{упр}$ — сила упругости пружины динамометра, $\vec{F}_{т}$ — сила тяжести, действующая на груз ($\vec{F}_{т} = m\vec{g}$), m — масса тела.

По третьему закону Ньютона вес тела $\vec{P} = -\vec{F}_{упр}$, поэтому уравнение (3) можно переписать в таком виде:

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}). \qquad (4)$$

В нашем случае при свободном падении груза его ускорение $\vec{a} = \vec{g}$. Так как векторы $\vec{P}$ и $\vec{g}$ сонаправлены, то проекции этих векторов на ось OX, направленную вертикально вниз, будут равны модулям соответствующих векторов, и равенство (4) примет следующий вид:

$$P = m\,(g - g) = 0. \qquad (5)$$

Итак, мы выяснили, что при свободном падении тела его вес равен нулю, т. е. свободно падающее тело находится в состоянии невесомости.

Всякое тело, на которое действует только сила тяжести или вообще сила всемирного тяготения, находится в состоянии невесомости.

***Перегрузка.** При старте космического корабля космонавты испытывают перегрузки. Этот термин означает, что вес космонавта по модулю становится больше силы тяжести. Выясним, почему это происходит.

После включения ракетного двигателя, когда ракета-носитель начинает разгоняться, ее движение и движение космонавта происходят с ускорением, направленным вертикально вверх. В этом случае проекция ускорения космонавта $\vec{a}$ на ось, направленную вертикально вниз, будет отрицательна, и уравнение (4) в скалярной форме примет вид:

$$P = m\,(g + a). \qquad (6)$$

Мы видим, что $P > mg$.

Состояние тела, при котором его вес по модулю превышает силу тяжести, называют *перегрузкой*. У человека в состоянии перегрузки затрудняется дыхание, ухудшается сердечная деятельность и т. д.

Для того чтобы избежать вредных последствий перегрузок на организм, космонавты при старте располагаются в специальных креслах — ложементах. Ложементы уменьшают вредное влияние перегрузок на тело космонавта. Перегрузке подвергаются пассажиры лифта в начале его подъема, когда лифт движется с ускорением.

Большую перегрузку испытывает летчик, выводящий самолет из пикирования. В нижней части траектории самолет движется по дуге окружности с центростремительным ускорением, равным по модулю $a = \frac{v^2}{R}$ и направленным противоположно ускорению свободного падения. Следовательно, вес летчика, т. е. сила, с которой он действует на сиденье, в соответствии с формулой (6) определяется выражением

$$P = mg + \frac{mv^2}{R}, \tag{7}$$

где v — скорость в нижней точке траектории; R — радиус дуги окружности.

Вес летчика больше «нормального веса», равного силе тяжести mg, на величину $\frac{mv^2}{R}$.*

Проверьте себя

1. Что такое вес тела?
2. При каких условиях вес тела равен по модулю силе тяжести, действующей на тело? К каким видам сил относятся эти силы?
3. В каких случаях тело находится в состоянии невесомости?
4. С каким ускорением должен опускаться лифт, чтобы его пассажиры перестали давить на пол?
5. Исчезает ли сила притяжения тела к Земле при переходе тела в состояние невесомости?
6. Можно ли сказать, что пловец, прыгающий с вышки, до соприкосновения с водой находится в состоянии невесомости? Почему?
7. Находились ли вы когда-нибудь в состоянии невесомости?
8. Когда возникает перегрузка?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Первым человеком, совершившим полет в космос, был Ю. А. Гагарин. 12 апреля 1961 года на корабле-спутнике «Восток» он облетел земной шар за 1 ч 48 мин.

Впервые в реальных условиях человеческий организм находился в состоянии невесомости длительное время.

О своих впечатлениях Ю. А. Гагарин рассказывал так: «Корабль вышел на орбиту. Наступила невесомость... — явление для всех нас, жителей Земли, несколько странное... Я оторвался от кресла, насколько это допустили привязные ремни, и как бы повис между потолком и полом кабины, испытывая исключительную легкость во всех членах... Все незакрепленные предметы парят... и планшет, и карандаш, и блокнот... Невесомость не сказывается на работоспособности человека. Все время я работал: следил за оборудованием корабля, наблюдал через иллюминаторы, вел записи в бортовом журнале».

§ 23. Сила трения

Во всех механических явлениях присутствуют силы трения. Наше движение по земле, движение транспортных средств и их торможение — результат действия сил трения. Силы трения возникают при непосредственном соприкосновении тел и всегда направлены вдоль поверхностей этих тел в отличие от сил упругости, направленных перпендикулярно этим поверхностям.

Трение покоя. Сила трения возникает при движении одного тела по поверхности другого, но она может существовать между соприкасающимися телами и когда эти тела неподвижны относительно друг друга.

Положим брусок на доску и поднимем ее за один край. Брусок не соскальзывает, т. е. находится в равновесии. На него действуют две силы, известные вам. Это сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила упругости; ее называют силой реакции опоры и обозначают буквой $\vec{N}$ (рис. 74). Они направлены под углом друг к другу и их равнодействующая не равна нулю. Почему же брусок неподвижен? Очевидно, имеется еще одна сила, которая уравновешивает равнодействующую силы тяжести и силы упругости. Это и есть сила трения покоя.

Чтобы изучить трение покоя, проделаем следующие опыты. На горизонтальную поверхность стола положим брусок и прицепим к нему динамометр. На брусок действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_т$ и сила реакции опоры $\vec{N}$ (рис. 75). Их равнодействующая равна нулю. Потянем брусок с помощью динамометра с некоторой силой (рис. 76). Эту силу измеряет динамометр. Брусок остается в покое, хотя на него действует сила упругости $\vec{F}_{упр}$ деформированной пружины динамометра. Следовательно, возникшая сила трения покоя $\vec{F}_{тр.п}$ уравновешивает силу $\vec{F}_{упр}$ (см. рис. 75).

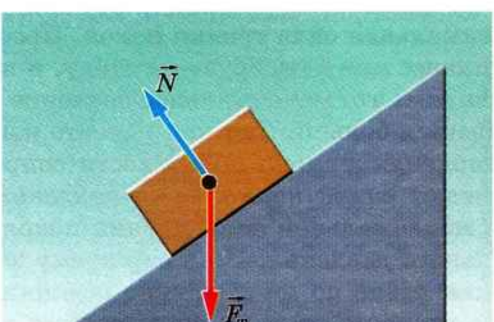


Рис. 74

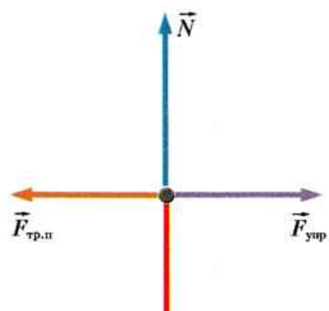


Рис. 75

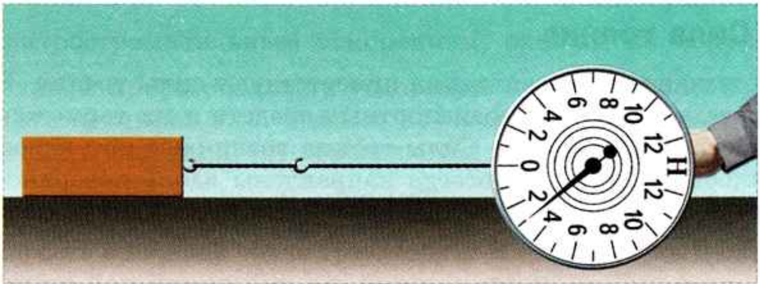


Рис. 76

Будем постепенно увеличивать силу $\vec{F}_{упр}$, но брусок по-прежнему остается в покое. Значит, одновременно увеличивается и сила трения покоя, оставаясь все время равной приложенной силе по модулю, но противоположно ей направленной:

$$\vec{F}_{тр.п} = -\vec{F}_{упр}.$$

В этом состоит главная особенность силы трения покоя: *сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно его поверхности; сила трения покоя действует вдоль поверхности соприкосновения этого тела с другим телом.*

Если параллельно поверхности соприкосновения тел не действуют никакие силы, то сила трения покоя равна нулю.

Наконец, при некотором значении действующей силы брусок начинает скользить по поверхности стола, при этом трение покоя заменяется трением скольжения.

Наш эксперимент показал, что *сила трения покоя имеет предельное, максимальное значение.*

Выясним, от чего зависит максимальная сила трения покоя. Поставим на брусок тяжелую гирю, чтобы сильнее прижать брусок к столу, и повторим описанный выше опыт. Мы увидим, что максимальное значение силы трения покоя в этом случае оказывается больше. Так как в опыте изменилась только сила, действующая перпендикулярно поверхности соприкосновения бруска с доской (ее называют *силой нормального давления*), то можно сделать вывод, что модуль максимальной силы трения покоя пропорционален модулю силы нормального давления. Но по третьему закону Ньютона сила нормального давления равна по модулю силе реакции опоры. Следовательно, максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы реакции опоры:

$$F_{max\ тр.п} \sim N.$$

Если взять брусок, изготовленный из другого материала, и вновь проделать опыты, аналогичные описанным, то окажется, что и в этом случае максимальная сила трения покоя будет зависеть от силы нормального давления. Но ее значение станет иным. Следовательно, максимальная сила трения покоя зависит от материала соприкасающихся поверхностей. Эту зависимость учитывают, вводя *коэффициент трения покоя* $\mu_п$ (греческая буква, читается: мю).

Тогда можно записать:

$$\boxed{F_{\max\,тр.\,п} = \mu_п N,}$$

где $F_{\max\,тр.\,п}$ — максимальное значение силы трения покоя; N — модуль силы реакции опоры; $\mu_п$ — коэффициент трения покоя.

Проделанные нами опыты свидетельствуют о том, что сила трения покоя препятствует началу движения, удерживает соприкасающиеся тела в относительном покое. В этих случаях она направлена в сторону, противоположную направлению возможного движения тела.

Однако бывают случаи, когда сила трения покоя служит причиной начала движения тела. Так, при ходьбе или беге именно сила трения покоя $\vec{F}_{тр.\,п}$, действующая на подошву обуви, является причиной возникновения ускорения, направленного в сторону движения (рис. 77, *а*). Подошва не скользит назад, и, значит, трение между ней и опорой (дорогой) — это трение покоя. Сила же $\vec{F}$, равная по модулю силе трения покоя $\vec{F}_{тр.\,п}$, но противоположно направленная, сообщает ускорение опоре (Земле).

Чтобы яснее представить сказанное, допустим, что человек бежит не по обычной дороге, а по специальной дорожке, установленной на подвижных роликах (рис. 77, *б*). В этом случае бегущий человек, отталкивая дорожку, заставляет ее двигаться в обратную сторону. Такие дорожки применяются для тренировки спортсменов и космонавтов.

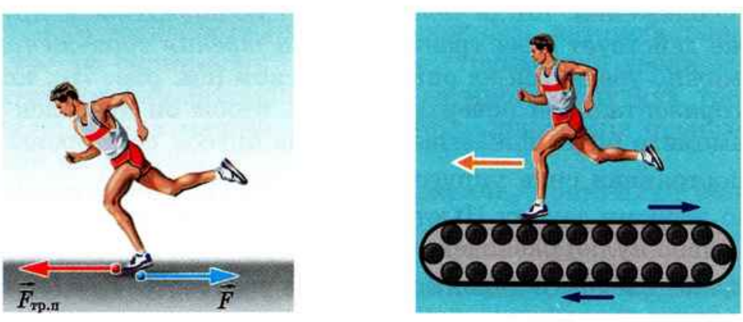


Рис. 77

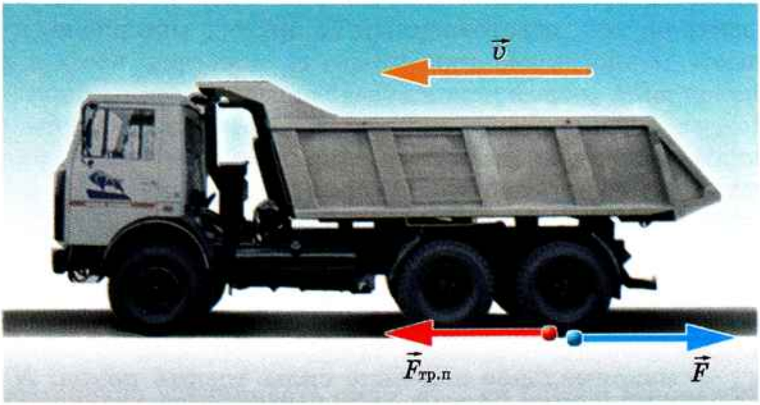


Рис. 78

Существованием силы трения покоя объясняется перемещение колесного транспорта. Соприкасающиеся поверхности дороги и шины находятся в относительном покое. Сила, приложенная к одному из ведущих колес, — сила трения покоя $\vec{F}_{тр.п}$ (рис. 78). Колесо автомобиля как бы «отталкивается» от дороги. Сила $\vec{F}$, равная по модулю силе трения покоя, направлена в противоположную сторону. Она действует со стороны колеса на дорогу (Землю).

Трение покоя полезно и во многих других случаях. Не будь трения, мы ничего не могли бы взять руками. Все предметы выскальзывали бы из рук. На ровном горизонтальном полу стоящая в комнате мебель сдвигалась бы с места при самом легком прикосновении, как если бы она стояла на очень скользком льду. В случае же небольшого наклона пола мебель «сбивалась» бы в угол комнаты. То же самое происходило бы и с предметами, лежащими на столе.

Трение скольжения. Когда тело скользит по поверхности другого тела, на него тоже действует сила трения — *сила трения скольжения.*

В этом можно убедиться на опыте с бруском (см. рис. 76). Если тянуть брусок по горизонтальной поверхности так, чтобы он двигался равномерно, то динамометр будет показывать, что на брусок со стороны пружины действует постоянная сила упругости $\vec{F}_{упр}$.

Согласно второму закону Ньютона при равномерном движении бруска (ускорение равно нулю) равнодействующая всех сил, приложенных к бруску, равна нулю. Следовательно, кроме силы упругости $\vec{F}_{упр}$ (сила тяжести и сила реакции опоры уравновешиваются) во время равномерного движения на брусок действует сила, равная по модулю силе упругости $\vec{F}_{упр}$, но направленная ей противоположно. Эта сила и есть сила трения скольжения.

Сила трения скольжения, как и максимальная сила трения покоя, зависит от силы реакции опоры $\vec{N}$, от материала трущихся тел и состояния их поверхностей:

$$\boxed{F_{тр} = \mu_с N.}$$

Величину $\mu_с$ называют *коэффициентом трения скольжения.* Его значение обычно меньше единицы.

В таблице 4 приведены коэффициенты трения скольжения для некоторых пар материалов.

Таблица 4

Материалы	$\mu_с$	Материалы	$\mu_с$
Бронза по чугуну	0,2	Резина по мокрому бетону	0,5
Древесина по древесине	0,4	Резина по сухому бетону	0,8
Кожа по льду	0,05	Сталь по стали	0,2
Кожа по древесине	0,2	Сталь по льду	0,02
Резина по древесине	0,7		

Сила трения скольжения всегда направлена противоположно относительной скорости соприкасающихся тел.

Трение скольжения, как и трение покоя, тоже может быть полезным и вредным. Полезно, например, трение скольжения в тормозных системах сухопутного транспорта (железнодорожного, автомобильного и т. д.), полезно и трение скрипичного смычка о струны (для увеличения трения смычок натирают канифолью). Однако во многих случаях трение скольжения вредно. У всех машин из-за трения скольжения происходит износ и нагревание их деталей.

Чтобы уменьшить силу трения скольжения, применяют смазку в виде тонкого слоя жидкости (обычно минерального масла) между трущимися поверхностями.

* Возникновение трения связано с взаимодействием частей поверхностей соприкасающихся тел, при их относительном смещении под действием внешней силы. Поэтому естественно, что сила трения скольжения

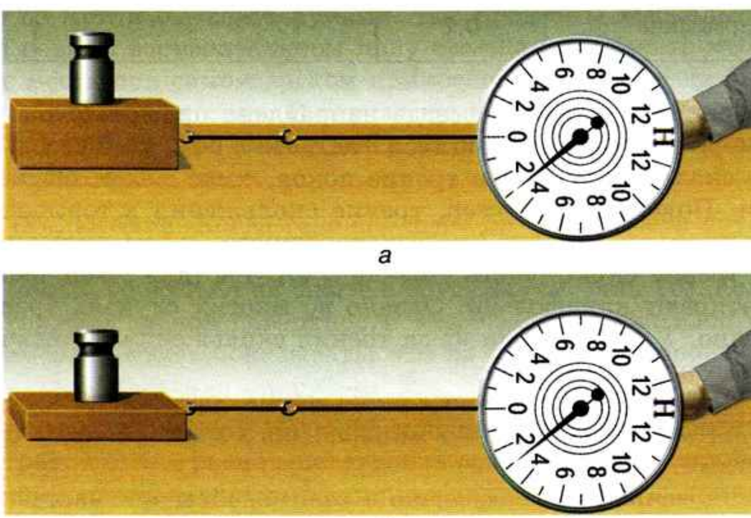
зависит от состояния этих поверхностей. При улучшении качества их обработки трение скольжения уменьшается.

Исследуем на опыте характер зависимости силы трения от площади поверхностей соприкасающихся тел. На стол поставим деревянный брусок, грани которого имеют разную площадь. Для увеличения силы давления поместим на брусок один или два груза. С помощью динамометра приведем брусок в равномерное движение (рис. 79, *а*).

Измерив возникающую силу трения, повернем брусок на другую грань и опыт повторим (рис. 79, *б*). Его результат и результаты других подобных опытов довольно неожиданны. Они показывают, что сила трения скольжения не зависит от площади грани бруска, на которую он опирается.

Объяснение этой особенности силы трения состоит в следующем. Даже обладая достаточно ровными поверхностями, тела соприкасаются друг с другом лишь небольшими, наиболее выступающими участками. Число и площадь этих участков практически не зависят от общей площади поверхностей тел и не меняются при движении тел относительно друг друга. Но именно они и определяют значение возникающей силы трения. По одному из образных сравнений «наложение двух твердых тел подобно наложению швейцарских Альп на перевернутые австрийские Альпы — площадь контакта оказывается очень малой».

Взаимодействие выступающих участков проявляется в зацеплении их друг за друга, точнее, во взаимодействии молекул этих участков в местах их соприкосновения. По этой причине наибольшие силы трения возникают



а

б

Рис. 79

между тщательно отполированными поверхностями, например, между двумя листами стекла.*

Трение качения. Положим деревянный брусок, с которым мы выполняли опыты по изучению трения покоя и скольжения, на круглые палочки. Прикрепим к бруску динамометр, и держа его горизонтально, рукой приведем брусок в равномерное движение. Динамометр покажет, что сила трения оказалась меньше, чем в случае, когда брусок не катился, а скользил по поверхности стола.

Если тело не скользит по поверхности другого тела, а катится, то возникающее в месте их соприкосновения трение называют *трением качения.*

К трению качения можно отнести трение колес железнодорожного вагона о рельсы, колес автомобиля о мостовую, трение при перекатывании бочек или труб о почву и т. д.

При одинаковых нагрузках сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения. Поэтому в тех случаях, когда надо уменьшить силу трения, трение скольжения заменяют трением качения. Для этой цели используют шариковые и роликовые подшипники (рис. 80). Внутреннее кольцо таких подшипников насаживают на вал какой-либо машины или станка. Наружное кольцо подшипника закрепляют в корпусе машины. Когда машину включают и вал начинает вращаться, то вместе с внутренним кольцом он начинает не скользить, а катиться на шариках или роликах, находящихся между кольцами подшипника.

Рис. 80

Применение шариковых или роликовых подшипников позволяет уменьшить силу трения в 20—30 раз.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Водитель выключил двигатель и резко затормозил при скорости автомобиля 72 км/ч. Определите время торможения и путь, пройденный до остановки, если коэффициент трения скольжения 0,5.

Решение. Начиная с момента торможения движение автомобиля определяется только силой трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ (рис. 81), так как сила тяжести, действующая на автомобиль, и сила реакции дороги скомпенсированы, а двигатель был отключен.

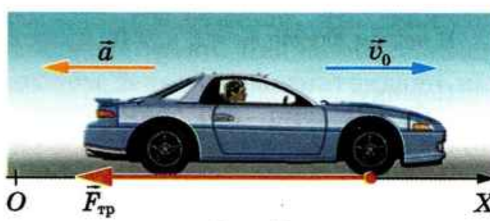


Рис. 81

Под действием силы трения $\vec{F}_{тр}$ автомобиль будет двигаться с ускорением

$\vec{a} = \dfrac{\vec{F}_{тр}}{m}$. Направим координатную ось OX вдоль направления движения автомобиля (см. рис. 81). Сила трения и вызванное ею ускорение направлены в сторону, противоположную оси. Поэтому проекции этих векторов на ось OX отрицательны, а по модулю равны модулям векторов. Следовательно, $a_x = -a = -\dfrac{F_{тр}}{m}$.

Но $a_x = \dfrac{v_x - v_{0x}}{t}$, где v_x и v_{0x} — проекции векторов $\vec{v}$ и $\vec{v}_0$ на ось OX. Обе проекции положительны, т. е. $v_x = v$ и $v_{0x} = v_0$. Отсюда $-a = \dfrac{v - v_0}{t}$.

Нас интересует время t от начала торможения (когда скорость автомобиля равна $\vec{v}_0$) до остановки (когда его скорость равна нулю). Тогда можно записать, что $a = \dfrac{v_0}{t}$ и $t = \dfrac{v_0}{a}$. Поэтому $t = \dfrac{mv_0}{F_{тр}}$.

Но $F_{тр} = \mu N$, где $N = mg$. Окончательно имеем:

$$t = \frac{v_0}{\mu g}. \qquad (1)$$

Из формулы следует, что время торможения автомобиля зависит от скорости его движения и от состояния дороги и не зависит от его массы.

Чем больше скорость тела, тем больше времени требуется для его остановки. При одной и той же начальной скорости автомобиля время его торможения при движении по скользкой дороге больше, чем при движении по сухой.

Найдем теперь путь, пройденный до остановки (его называют *тормозным путем*). Тормозной путь равен модулю перемещения автомобиля за время t. Чтобы его вычислить, можно воспользоваться формулой для проекции перемещения на ось OX:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Но проще использовать формулу

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

В нашем случае $s_x = l$, $v_x = 0$, $v_{0x} = v_0$, $a_x = -a = -\dfrac{F_{тр}}{m} = -\mu g$.

Поэтому

$$l = \frac{v_0^2}{2\mu g}. \qquad (2)$$

Таким образом, *пройденный до остановки путь прямо пропорционален квадрату начальной скорости.*

Подставим в выражения (1) и (2) числовые значения величин из условия задачи. Учитывая, что v = 72 км/ч = 20 м/с, g = 9,8 м/с^2, получим:

$$t = \frac{20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}5 \cdot 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \approx 4\ \text{с}; \quad l = \frac{\left(20\ \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \approx 40\ \text{м}.$$

Ответ: время торможения $t \approx 4$ с; тормозной путь $l \approx 40$ м.

Проверьте себя

1. Приведите примеры действия силы трения покоя и силы трения скольжения.
2. На неподвижный брусок посредством динамометра действуют силой упругости, параллельной поверхности стола. Показания динамометра изменялись от нуля до некоторого значения F, при котором брусок начинает скользить. Нарисуйте график зависимости $F_{\text{тр.п}}$ от $F_{\text{упр}}$.
3. Стол стоит на горизонтальном полу. Какие силы на него действуют? Чему равна сила трения покоя?
4. Напишите формулу для силы трения скольжения и поясните значение входящих в нее величин.
5. Почему нельзя переходить дорогу перед близко идущим автомобилем?
6. Как можно уменьшить силу трения?
7. Вычислите силу, с которой нужно толкать деревянный брус по деревянному полу, чтобы он двигался с постоянной скоростью. Масса бруса 20 кг. Пол горизонтальный.

*8. С какой минимальной силой нужно прижать резиновый брусок массой 2 кг к вертикальной бетонной стене, чтобы он не скользил вниз?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Тормозной путь автомобиля при скорости 60 км/ч по сухому бетону составляет 18 м, по мокрому — 28 м, а при скорости 120 км/ч, — соответственно, 72 м и 112 м.

*§ 24. Центр масс

Изучая движение тел под действием сил, мы считали, что движутся тела, которые можно принять за материальные точки. Движение тележек, деревянного бруска по поверхности другого тела мы рассматривали как движение точки, расположенной в центре масс (см. рис. 49). Теперь выясним, где находится эта точка и почему возможна замена реального тела этой точкой.

В § 2 указывалось, что размеры тела можно не учитывать и считать тело материальной точкой, если оно движется поступательно. При таком движении все точки движутся одинаково — с одинаковыми скоростями и ускорениями. В этом случае достаточно проследить за движением какой-то одной точки. Значит, надо выяснить, при каких условиях тело движется поступательно.

Проведем такой опыт. Возьмем брусок прямоугольной формы и с помощью нити, прикрепленной к нему, приложим в точке A силу $\vec{F}$, направленную вдоль его горизонтальной оси (рис. 82, *а*; на этом и последующих рисунках изображен вид сверху). Брусок придет в поступательное движение.

Видоизменим опыт. Прикрепим нить в точке B и приложим силу $\vec{F}$, линия действия которой совпадает с короткой осью бруска (рис. 82, *б*). Опыт показывает, что в этом случае брусок также движется поступательно.

Изобразим на рисунке 82, *в* линии действия этих сил и проведем через точку O их пересечения произвольную линию. Приложим в точке C силу $\vec{F}$, направленную вдоль этой линии (рис. 82, *г*). Она также вызывает поступательное движение бруска. Но если с помощью той же нити приложить в точке C силу, направленную перпендикулярно горизонтальной оси бруска (рис. 82, *д*), то брусок повернется, т. е. его движение не будет поступательным.

Таким образом, мы приходим к выводу: *чтобы тело двигалось поступательно, линии действия всех приложенных к нему сил должны пересекаться в одной точке*. Разумеется, такой точкой не может быть любая точка тела. Однако многочисленные опыты показывают, что такая точка есть и эта точка единственная. Ее называют *центром масс*.

Центр масс движется так, как под действием внешних сил двигалась бы материальная точка, масса которой равна массе тела.

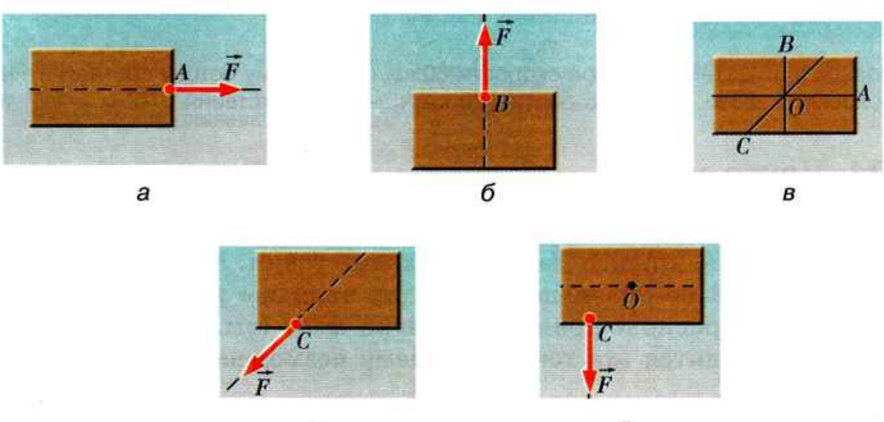


Рис. 82

Положение центра масс в случае, когда размеры тела малы по сравнению с расстоянием до центра Земли, совпадает с положением центра тяжести тела.

В § 20 мы выяснили, как можно найти опытным путем положение центра тяжести плоского тела произвольной формы.

Для симметричных фигур положение центра тяжести (центра масс) можно указать, используя свойства симметрии. Так, в однородном диске и шаре центр масс расположен в их центре. Центр масс однородной пластины в форме параллелограмма или бруска в форме параллелепипеда находится в точке пересечения их диагоналей. Центр масс может находиться и вне тела. Например, центр масс кольца расположен в его центре.

Для тел произвольной формы положение центра масс (центр тяжести) находят путем сложных математических расчетов.

Проверьте себя

1. Какое движение тела называют поступательным?
2. При каких условиях тело движется поступательно?
3. Что такое центр масс?
4. Как опытным путем можно найти положение центра масс тела?
5. Как ведет себя тело, к которому приложена сила, линия действия которой проходит через центр масс? не проходит через центр масс?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 6

1. С помощью физической величины, называемой силой, количественно описывают взаимодействие тел. Результатом взаимодействия тел, т. е. результатом действия сил, может быть изменение скорости тел, а также их деформация.

2. Сила всемирного тяготения, сила упругости, сила трения — основные виды сил в механике.

3. Сила взаимного притяжения тел определяется законом всемирного тяготения, открытым Ньютоном в 1687 году.

4. Закон всемирного тяготения гласит: тела (материальные точки) притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где G — гравитационная постоянная.

5. Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения двух материальных точек массой по 1 кг каждая, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга:

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

6. Силу всемирного тяготения, действующую на тело со стороны Земли, называют силой тяжести. Вблизи поверхности Земли сила тяжести сообщает всем телам одинаковое ускорение.

7. Если телу, находящемуся вблизи поверхности Земли, сообщить в горизонтальном направлении скорость около 8 км/с (первая космическая скорость), оно станет искусственным спутником, обращающимся вокруг Земли по круговой орбите.

8. Сила упругости возникает при деформации тела. Согласно закону Гука, при небольших деформациях сжатия и растяжения модуль $F_{упр}$ силы упругости прямо пропорционален модулю удлинения x тела:

$$F_{упр} = k\,|x|,$$

где $x = l - l_0$ — удлинение тела (разность его конечной l и начальной l_0 длины); k — *жесткость* тела.

9. Любое лежащее или подвешенное тело вследствие притяжения к Земле деформируется опорой или подвесом. Возникающую при этом силу упругости называют весом тела $\vec{P}$. Вес тела приложен соответственно к опоре или к подвесу, препятствующим его свободному падению, направлен вертикально вниз и по модулю равен силе тяжести, действующей на тело:

$$P = mg.$$

10. Сила трения возникает при непосредственном соприкосновении тел и всегда направлена вдоль поверхности этих тел. Сила трения препятствует относительному перемещению соприкасающихся тел.

11. Сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом.

12. Максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы реакции опоры $\vec{N}$:

$$F_{max.\ тр.п} = \mu_п N,$$

где $\mu_п$ — коэффициент трения покоя, характеризующий оба соприкасающихся тела (материал, обработку их поверхности и т. д.).

13. Сила трения скольжения возникает при относительном движении соприкасающихся тел. Она так же, как и максимальная сила трения покоя, зависит от силы реакции опоры $\vec{N}$ (ее модуля), от материала трущихся тел и состояния их поверхности:

$$F_{тр} = \mu_с N,$$

где $\mu_с$ — коэффициент трения скольжения. Сила трения скольжения направлена в сторону, противоположную направлению движения одного из соприкасающихся тел относительно другого.

14. Движение тела можно рассматривать как движение материальной точки, если тело движется поступательно. Тело движется поступательно, если линии действия сил, приложенных к телу, проходят через его центр масс (центр тяжести).

глава 7

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

При изучении кинематики и динамики вы познакомились со многими физическими величинами, характеризующими движение тел (координата, перемещение, скорость, ускорение), а также с величиной, определяющей изменение скорости тела, — силой.

Вы видели, как законы движения позволяют решать задачи механики, если известны силы, приложенные к телам. Но во многих случаях нахождение сил взаимодействия тел представляет значительные трудности. Когда, например, рассматривается взаимодействие ракеты и вытекающих из нее газов, или столкновение двух тел (автомобилей, вагонов и др.), трудно определить значения возникающих при этом сил. Однако, оказывается, такие задачи можно решить, не зная значений сил, действующих на тело. Это возможно потому, что существуют величины, характеризующие движение тел, которые не изменяют своего значения, т. е. *сохраняются* при определенных условиях. К таким сохраняющимся величинам относятся *импульс* и *энергия*. Эти величины подчиняются соответствующим *законам сохранения*.

Законы сохранения — фундаментальные законы физики. Они имеют исключительно большое значение, так как применимы не только в механике, но и в других разделах физики.

§ 25. Импульс

Слово «импульс» (*impulsus*) в переводе с латинского означает «толчок». В механике этим термином обозначают две величины: импульс силы и импульс тела.

Импульс силы. Проделаем следующие опыты. На горизонтальное стекло положим стальной шарик. Быстро пронеся над ним сильный магнит, мы заметим, что шарик лишь едва сдвинулся с места (рис. 83, *а*). Повторим опыт, пронеся магнит над шариком

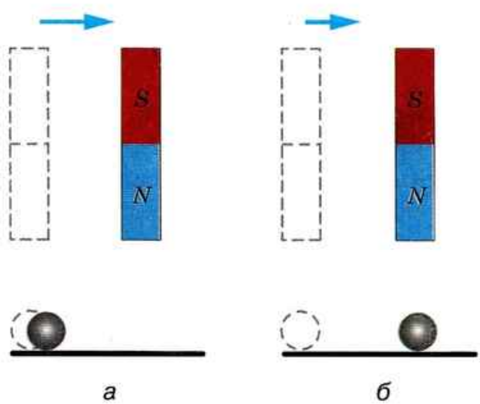
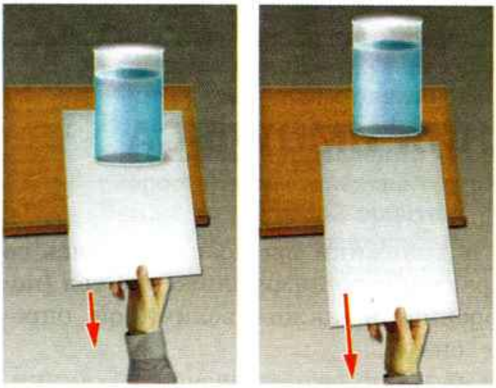


Рис. 83



а *б*

Рис. 84

медленно. В этом случае шарик придет в движение и будет двигаться вслед за магнитом (рис. 83, *б*).

На лист бумаги, лежащий на краю стола, поставим стакан с водой. Если медленно тянуть бумагу, то стакан сдвинется с места и будет перемещаться вместе с ней (рис. 84, *а*). Если же лист дернуть сильнее, он выдернется из-под стакана, а стакан останется на прежнем месте (рис. 84, *б*).

Проделанные опыты свидетельствуют о том, что результат действия тел друг на друга зависит от времени их взаимодействия. Поэтому в физике для характеристики действия силы ввели специальную величину — *импульс силы*.

Импульсом силы называют величину, равную произведению силы на время ее действия:

$$\vec{I} = \vec{F}t,$$

где $\vec{I}$ — импульс силы, $\vec{F}$ — сила, t — время действия силы. Следовательно, импульс силы — это временна́я характеристика действия силы.

Импульс силы — векторная величина. Вектор импульса силы направлен так же, как и вектор силы.

Единица импульса силы в СИ — 1 Н · с (ньютон-секунда).

Импульс тела. Допустим, что по наклонной эстакаде скользит пакет с газетами массой 2 кг (рис. 85) со скоростью 1 м/с. Внизу эстакады пакет можно легко остановить руками. Но если по эстакаде с такой же скоростью скользит мешок с песком массой 50 кг, его руками остановить нельзя.

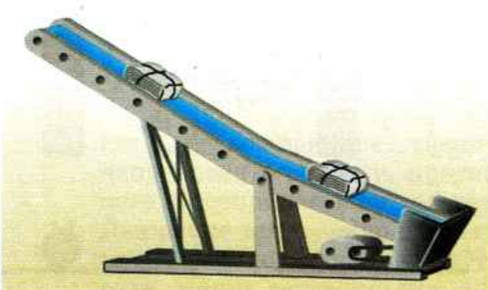


Рис. 85

Пуля массой 9 г, движущаяся со скоростью 1 м/с, может быть остановлена тонкой тканью или листом картона, а ту же пулю, но выпущенную из винтовки со скоростью 800 м/с, нельзя остановить даже с помощью трех толстых досок.

Приведенные примеры говорят о том, что для характеристики движения тела недостаточно знать только его массу или скорость. Поэтому была введена новая величина — *импульс тела*.

Импульсом тела называют физическую величину, равную произведению массы тела на его скорость:

$$\boxed{\vec{p} = m\vec{v},}$$

где $\vec{p}$ — импульс, m — масса тела, $\vec{v}$ — скорость его движения.

Импульс тела — векторная величина. Вектор импульса тела направлен так же, как и вектор скорости.

Единица импульса тела — 1 кг · м/с (килограмм-метр в секунду).

Соотношение между импульсом силы и импульсом тела. Допустим, что тело массой m двигалось со скоростью $\vec{v}_0$. Затем на это тело в течение времени t действовала сила $\vec{F}$. Во время действия силы тело имело ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t},$$

где $\vec{v}$ — конечная скорость тела.

По второму закону Ньютона $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$. Следовательно, $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\vec{F}}{m}$ или

$$\boxed{m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{F}t.} \qquad (1)$$

В полученной формуле:

$m\vec{v}_0$ — импульс тела до начала действия силы;

$m\vec{v}$ — импульс тела после прекращения действия силы;

$m\vec{v} - m\vec{v}_0$ — изменение импульса тела;

$\vec{F}t$ — импульс силы.

Таким образом, *изменение импульса тела равно импульсу внешней силы*.

Именно в таком виде Ньютон сформулировал свой второй закон.

Полученное соотношение показывает, что одинаковые изменения импульса тела могут быть получены в результате действия большой силы в течение малого интервала времени или малой силы за большой интервал времени.

Когда вы прыгаете с какой-то высоты, то изменение импульса при остановке вашего тела происходит за счет действия силы реакции со стороны пола или земли. Чем меньше продолжительность столкновения, тем больше должна быть сила реакции. Ее действие может вызвать негативные изменения в организме. Для уменьшения этой силы надо, чтобы торможение происходило постепенно. Вот почему при прыжках в высоту спортсмены приземляются на песок или мягкие маты. Прогибаясь, они постепенно тормозят спортсмена. По той же причине при прыжке с высоты приземляться надо не на прямые, а на полусогнутые в коленях ноги и лучше на рыхлый грунт, а не на асфальт.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Мальчик массой 50 кг спрыгивает с дерева на землю с высоты 2,5 м. Если он приземляется на прямые ноги, то время остановки равно 0,1 с, а если на полусогнутые в коленях, то 0,5 с. Чему равна средняя сила реакции, действующая на ноги мальчика со стороны земли в том и в другом случае?

Решение. В обоих случаях скорость v мальчика перед касанием земли одна и та же. Ее можно найти из формулы равноускоренного движения:

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x s_x.$$

Направим ось OX вертикально вниз, тогда $v_x = v$; $v_{0x} = 0$; $a_x = g$; $s_x = h$, где h — высота, с которой прыгал мальчик. Значит,

$$v = \sqrt{2gh}; \; v = \sqrt{2 \cdot 9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 2{,}5\ \text{м}} = 7\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В соответствии с формулой (1) изменение импульса мальчика $(mv - 0)$ равно импульсу силы $\vec{F}$, действовавшей на мальчика: $mv = Ft$.

Для искомой силы получаем выражение:

$$F = \frac{mv}{t},$$

из которого следует, что при падении на прямые ноги $F_1 = \dfrac{50\ \text{кг} \cdot 7\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}1\ \text{с}} = 3500$ Н,

тогда как при падении на полусогнутые — $F_2 = \dfrac{50\ \text{кг} \cdot 7\,\frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}5\ \text{с}} = 700$ Н.

Обратите внимание, что даже при приземлении на полусогнутые ноги сила реакции земли очень велика. Прыгать с большой высоты опасно!

Проверьте себя

1. Какую величину называют импульсом тела? В каких единицах она выражается?
2. Может ли импульс тела равняться нулю?
3. Каково соотношение между импульсом силы и импульсом тела?

4. Чему равен суммарный импульс системы, состоящей из двух тел одинаковой массы, движущихся с одинаковой по модулю скоростью в противоположных направлениях? (Не забудьте, что импульс тела — векторная величина.)
5. Найдите модуль импульса: а) тела массой 10 кг, движущегося со скоростью 5 м/с; б) тела массой 5 кг, движущегося со скоростью 10 м/с; в) тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 50 м/с.
6. На тело в течение 2 с действовала сила 2 Н. Найдите импульс силы и изменение импульса тела.
7. Кусок пластилина массой $m = 100$ г перед ударом о стенку двигался со скоростью $\upsilon = 8$ м/с. Деформируясь при ударе, пластилин прилипает к стенке и принимает окончательную форму через время $t = 0{,}2$ с. Найдите среднюю силу давления пластилина на стенку при ударе.

*8. Теннисный мячик массой m подлетает к вертикальной стенке со скоростью $\vec{\upsilon}$ (рис. 86, *а*) и отлетает от нее с той же по модулю скоростью (рис. 86, *б*). Чему равен модуль изменения импульса мячика?

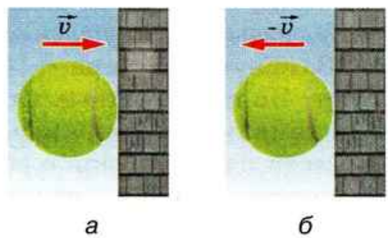


Рис. 86

*9. Стальной шарик массой 100 г свободно падает на стол с высоты 50 см и, отскочив, поднимается на высоту 30 см. Найдите среднюю силу действия шарика на стол за время удара, длившегося 0,01 с. Во сколько раз эта сила больше силы тяжести, действующей на шарик? Считать $g = 10$ м/с^2.

*10. Мяч массой 0,5 кг брошен с некоторой скоростью, направленной под углом к горизонту (рис. 87). На сколько изменился по модулю импульс мяча за первые 2 с полета?

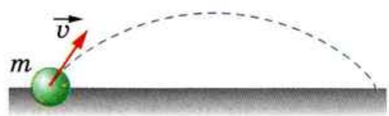


Рис. 87

§ 26. Закон сохранения импульса

***Изолированная система тел.** Все тела в природе взаимодействуют друг с другом, но не все взаимодействия необходимо учитывать при решении той или иной задачи. Например, при расчете траектории полета космического корабля в пределах Солнечной системы силы его взаимодействия со звездами можно не учитывать, так как они значительно меньше сил притяжения, действующих со стороны Солнца и планет Солнечной системы.

Рассматривая удар футболиста по мячу, можно не учитывать силы притяжения мяча к другим игрокам или зрителям, так как эти силы на-

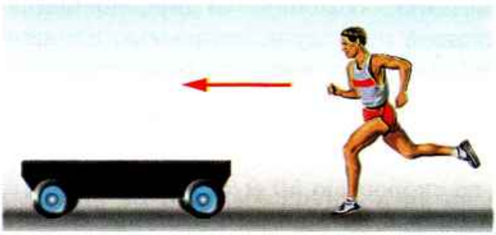


Рис. 88

столько малы, что не оказывают никакого влияния на результат взаимодействия ноги футболиста и мяча.

Эти примеры свидетельствуют о том, что в тех случаях, когда взаимодействия не оказывают существенного влияния на изучаемое явление, их можно не учитывать.

Группу тел, или, как говорят, систему тел, взаимодействующих между собой, но не взаимодействующих с другими телами, называют *замкнутой, или изолированной системой.*

Силы, с которыми взаимодействуют тела, входящие в замкнутую систему, называют *внутренними.*

Замкнутая система — это идеализация. Все тела в мире взаимодействуют. Но в конкретных случаях реальные системы можно рассматривать как замкнутые. Например, летящий снаряд, на который действуют сила тяжести и сила трения о воздух, не является замкнутой системой. Однако за короткое время взрыва образовавшиеся осколки считать замкнутой системой можно, так как силы, разрывающие снаряд, очень велики.

Рассмотрим еще такой пример. Человек с разбегу запрыгивает на легкоподвижную тележку, покоящуюся на горизонтальной поверхности. Систему тел, состоящую из тележки и человека, можно считать замкнутой, так как:

а) силы тяжести, действующие на тележку и человека, уравновешиваются силами реакции опоры;

б) для легкоподвижной тележки силой трения можно пренебречь;

в) силу трения в колесных осях и силу взаимодействия человека с тележкой при решении вопроса о замкнутости системы рассматривать не нужно, так как эти силы — внутренние.*

Закон сохранения импульса. Пусть взаимодействуют два тела массами m_1 и m_2, образующие замкнутую систему и имеющие в выбранной системе отсчета начальные скорости $\vec{v}_{01}$ и $\vec{v}_{02}$. Через некоторый промежуток времени их скорости оказываются равными $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. Силы взаимодействия, какой бы природы они ни были, согласно третьему закону Ньютона, равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Запишем для каждого тела второй закон Ньютона в форме, выражающей связь между импульсом силы и изменением импульса тела.

Для первого тела:

$$\vec{F}_1 t = m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01};$$

для второго тела:

$$\vec{F}_2 t = m_2\vec{v}_2 - m_2\vec{v}_{02}.$$

Так как $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, то $m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01} = -(m_2\vec{v}_2 - m_2\vec{v}_{02})$ или $m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_{01} = m_2\vec{v}_{02} - m_2\vec{v}_2$. Перенеся импульсы тел до взаимодействия в одну сторону равенства, а после взаимодействия в другую, получим:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

Обозначив каждый импульс одной буквой $\vec{p}$ ($m_1\vec{v}_{01} = \vec{p}_{01}$, $m_2\vec{v}_{02} = \vec{p}_{02}$, $m_1\vec{v}_1 = \vec{p}_1$, $m_2\vec{v}_2 = \vec{p}_2$), перепишем это выражение в виде:

$$\boxed{\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.}$$

В левой части равенства стоит сумма импульсов обоих тел до взаимодействия, в правой — сумма импульсов тех же тел после взаимодействия. Импульс каждого тела изменился, но сумма импульсов осталась неизменной.

Это равенство выражает *закон сохранения импульса.*

Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы.

Мы пришли к закону сохранения импульса, применив к взаимодействию тел второй и третий законы Ньютона. Однако закон сохранения импульса не является следствием законов Ньютона. Это фундаментальный, самостоятельный закон природы, не знающий никаких исключений. Этот закон абсолютно точно соблюдается и в макромире, и в микромире.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Железнодорожный вагон массой 60 т, движущийся со скоростью 1 м/с, сталкивается с неподвижным вагоном, масса которого 40 т, и сцепляется с ним. Какова скорость вагонов после сцепки? (Участок пути считать прямолинейным, трение не учитывать).

Решение. Для решения задачи существенно важно, что трение можно не учитывать: это позволяет рассматривать систему вагонов как замкнутую и применить закон сохранения импульса.

Обозначим массы вагонов через m_1 и m_2, скорость первого вагона до сцепки — через $\vec{v}_1$, скорость второго вагона — через $\vec{v}_2$ ($\vec{v}_2 = 0$), а скорость вагонов после сцепки — через $\vec{v}$.

По закону сохранения импульса,

$$m_1\vec{v}_1 = (m_1 + m_2)\vec{v}.$$

В проекциях на координатную ось OX, направленную вдоль вектора скорости первого вагона, имеем:

$$m_1 v_{1x} = (m_1 + m_2)v_x.$$

Так как $v_{1x} = v_1$, то

$$v_x = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Подставив числовые данные из условия задачи, получим:

$$v_x = \frac{60\,000\ \text{кг} \cdot 1\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{100\,000\ \text{кг}} = 0{,}6\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: так как проекция v_x скорости $\vec{v}$ положительна, то вектор $\vec{v}$ направлен так же, как вектор $\vec{v}_1$, т. е. после сцепки оба вагона движутся в направлении движения первого вагона, но с меньшей скоростью, равной по модулю 0,6 м/с.

Проверьте себя

1. Что такое замкнутая (изолированная) система тел?
2. В чем состоит закон сохранения импульса? При каких условиях он выполняется?
*3. Могут ли осколки взорвавшейся гранаты лететь в одном направлении, если до взрыва граната покоилась? А если двигалась?
4. Человек, бегущий со скоростью 10 м/с, догоняет тележку, движущуюся со скоростью 1 м/с, и вскакивает на нее. С какой скоростью станет двигаться тележка после этого? Массы человека и тележки соответственно равны 60 и 40 кг.
*5. Во время маневров на железнодорожной станции две платформы массами 24 и 16 т двигались навстречу друг другу со скоростями, модули которых соответственно равны 0,5 и 1 м/с. Найдите скорость их совместного движения после того, как сработала автосцепка.
6. В книге немецкого писателя Э. Распе «Приключения барона Мюнхгаузена» приведен следующий рассказ барона: «Однажды попробовал я перепрыгнуть через болото верхом на коне. Но конь не допрыгнул до берега, и мы шлепнулись в жидкую грязь. Шлепнулись и стали тонуть. Спасения не было. Болото с ужасной быстротой засасывало нас глубже и глубже... Что было делать? Мы непременно погибли бы, если бы не удивительная сила моих рук... Схватив себя за волосы, я изо всех сил дернул вверх и без большого труда вытащил из болота и себя, и своего коня, которого крепко сжал обеими ногами, как щипцами...» Докажите, что ничего подобного барон сделать не мог.

7. Брусок массой m с прикрепленной к нему невесомой пружинкой скользит со скоростью $\vec{v}$ к такому же неподвижному бруску (рис. 89). Трения нет. Каким будет модуль суммарного импульса этих тел в тот момент, когда пружинка максимально сожмется, и после того, как пружинка растолкнет тела в разные стороны? Какой будет скорость скольжения брусков в тот момент, когда пружинка максимально сожмется?

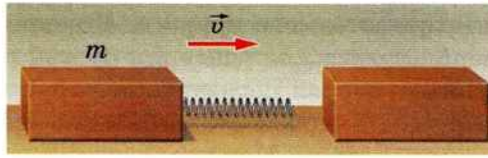


Рис. 89

8. При выстреле из пистолета вылетает пуля массой m со скоростью $\vec{v}$. Масса пистолета в 100 раз больше массы пули. Какой по модулю импульс получает после выстрела пистолет? Какую по модулю скорость после выстрела приобретает пистолет?
9. С тележки, груженной кирпичом и движущейся горизонтально, случайно упал незакрепленный кирпич. Как изменилась при этом скорость тележки (без учета упавшего кирпича): увеличилась? уменьшилась? не изменилась?

§ 27. Реактивное движение

Равные и направленные в противоположные стороны силы взаимодействия, о которых говорится в третьем законе Ньютона, широко используются в технике и в быту. Каждый из нас при беге и ходьбе отталкивает Землю назад, а та, в свою очередь, толкает наше тело вперед. Одна из сил взаимодействия между пропеллером самолета и воздухом приводит в движение самолет, другая отбрасывает воздух назад. Точно так же корабельный винт, отбрасывая воду назад, сам вместе с кораблем перемещается вперед.

Силы взаимодействия в огнестрельном оружии приводят в движение пули и снаряды и одновременно с этим вызывают так называемую отдачу,

Циолковский Константин Эдуардович (1857—1935) — русский ученый и изобретатель, основоположник космонавтики. Впервые обосновал возможность использования ракетных двигателей для межпланетных кораблей.

или откат самого оружия. В современной технике отдача при выстреле используется для удаления пустой гильзы и для сжатия специальной пружины, которая перезаряжает оружие и автоматически производит новый выстрел. Впервые этот принцип использовал изобретатель станкового пулемета Хайрем Максим.

Особенно важное практическое значение имеет отдача для приведения в движение реактивных самолетов и ракет. Ракетные двигатели замечательны тем, что способны работать не только в воздухе, но и в безвоздушном пространстве, поскольку кислород, необходимый для горения топлива, входит в его состав. Поэтому они используются для полетов в верхних, сильно разреженных слоях атмосферы, для выведения на орбиту искусственных спутников Земли, движения космических кораблей.

Во всех этих примерах речь идет о *реактивном движении* — движении, возникающем у тела в результате отделения от него с некоторой скоростью какой-либо его части. С этим движением и опытами, в которых оно наблюдается, вы познакомились в 7-м классе (см. § 43 учебника физики).

Для изучения реактивного движения удобно использовать закон сохранения импульса. С помощью этого закона можно, например, оценить скорость движения ракеты, которую она получает после окончания работы двигателя.

Будем считать, что ракета с выключенным двигателем, заправленная топливом, находится в космическом пространстве вдали от звезд и планет, тогда она представляет собой замкнутую систему и к ней можно применить закон сохранения импульса.

В системе отсчета, где ракета покоится, ее импульс равен нулю: $\vec{p} = 0$.

Пусть в некоторый момент времени двигатель заработал и произошел мгновенный выброс газов (продуктов сгорания) со скоростью $\vec{v}_г$ относительно ракеты. При этом ракета приходит в движение со скоростью $\vec{v}$ в противоположном направлении.

Суммарный импульс системы (ракета и газы) будет равен

$$\vec{p}' = m\vec{v} + m_г\vec{v}_г,$$

где $m = M - m_г$ — конечная масса ракеты (M — первоначальная масса ракеты вместе с топливом); $m_г$ — масса выброшенного газа; $\vec{v}_г$ — скорость выброса газа; $\vec{v}$ — скорость ракеты.

*Обратите внимание, что состав нашей замкнутой системы тел изменился. Если до начала движения в нее входили ракета и топливо, находившееся в ракете, то теперь это — ракета и газы (продукты сгорания), движущиеся вдали от ракеты. Новая система тел по-прежнему замкнута, поскольку находится далеко от звезд и планет. Но можно ли сравнивать импульсы старой и новой системы тел?

Да, можно. Ведь силы взаимодействия газов и ракеты — это внутренние силы, которые не могут изменить суммарный импульс системы. А то, что газы находятся вдали от ракеты, не имеет значения. Главное — знать их массу (она равна массе сгоревшего топлива) и учесть их импульс, что мы и сделали при подсчете суммарного импульса ракеты и газов. Еще одно подразумевающееся условие — неизменность общей массы системы.*

Итак, в соответствии с законом сохранения импульса суммарный импульс тел системы измениться не мог:

$$\vec{p} = \vec{p}',$$

или

$$0 = m\vec{v} + m_{\text{г}}\vec{v}_{\text{г}}.$$

Направим координатную ось по направлению скорости ракеты, тогда в проекциях на ось это уравнение будет иметь вид:

$$0 = mv_x + m_{\text{г}}v_{\text{г}x}.$$

Отсюда

$$v_x = -\frac{m_{\text{г}}}{m}v_{\text{г}x}.$$

Так как $v_x = v$, а $v_{\text{г}x} = -v_{\text{г}}$, то для определения модуля скорости ракеты получим выражение

$$v = \frac{m_{\text{г}}}{m}v_{\text{г}}.$$

Проанализируем его. Из этого выражения видно, что скорость ракеты тем больше, чем больше скорость выбрасываемых газов и чем больше отношение массы газа к конечной массе ракеты. Если, например, первоначальная масса ракеты 70 т, масса выброшенных газов и их скорость соответственно составляют 2500 кг и 2000 м/с, то ракета приобретет скорость 74 м/с.

Королев Сергей Павлович (1907—1966) — академик, выдающийся ученый, конструктор ракет, человек, с именем которого связано начало космической эры. Первый искусственный спутник, первый полет человека в космос были осуществлены под его руководством.

Чтобы ракета приобрела скорость 8 км/с (первая космическая скорость), масса сгоревшего топлива должна составлять 56 т, т. е. полезной будет только масса 14 т, что в 5 раз меньше начальной массы ракеты.

В наших рассуждениях мы считали, что весь газ выбрасывается мгновенно. На самом деле он вытекает постепенно. Кроме того, мы сделали расчет для открытого космоса, а вблизи Земли на ракету действуют сила тяжести и сила сопротивления воздуха.

Учет этих факторов приводит к тому, что масса топлива должна быть больше первоначальной массы ракеты в десятки раз. Например, масса космического корабля «Аполлон-11» была 47 т, а стартовая масса ракеты-носителя 2950 т, т. е. основная масса ракеты — это масса топлива, и отношение $\frac{m_г}{m} \approx 62$.

Идея использования ракет для космических полетов впервые была высказана русским ученым и изобретателем К. Э. Циолковским.

Идеи К. Э. Циолковского были осуществлены отечественными учеными и инженерами под руководством выдающегося ученого, конструктора ракетно-космических систем, академика С. П. Королева.

Проверьте себя

1. Какое движение называют реактивным?
2. Какой закон объясняет реактивное движение?
3. Является ли реактивным движение винтового самолета?
4. Какие два взаимодействующих тела составляют замкнутую систему ракеты?
5. От каких величин зависит скорость ракеты?
6. Почему ракета может двигаться в вакууме?
7. Вы перебросили груз из своей лодки в другую. При этом ваша лодка пришла в движение. Можно ли движение лодки назвать реактивным?
8. Чему равна скорость находившейся в покое ракеты массой 10 кг после вылета из нее продуктов сгорания массой 0,1 кг со скоростью 500 м/с?

*9. Газ вырывается из ракеты со скоростью 2 км/с. Какая сила действует на ракету, если за секунду сгорает 2 кг топлива?

*10. К какому виду механических сил (гравитационные силы, силы упругости или силы трения) относятся силы взаимодействия ракеты и газов, образующихся при горении топлива?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 7

1. Временно́й характеристикой действия силы является импульс силы. Импульс силы равен произведению силы на время ее действия. Вектор импульса силы направлен по направлению вектора силы.

2. Импульсом тела называют произведение массы этого тела на его скорость. Вектор импульса направлен по направлению вектора скорости тела.
3. Изменение импульса тела равно импульсу действовавшей на него силы.
4. Систему тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в эту систему, называют замкнутой (или изолированной) системой.
5. Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой. В этом состоит закон сохранения импульса.
6. Движение тела, возникающее при отделении от него с какой-либо скоростью некоторой его части, называют реактивным движением.

глава 8

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Энергия — одна из самых важных, если не самая важная сохраняющаяся физическая величина. С ней приходится иметь дело не только в механике, но и в физике вообще, а также во всех науках о природе, во всех отраслях техники.

Понятие энергии было неясным вплоть до середины XIX века. Ни Галилей, ни Ньютон не знали, что существует физическая величина, которая теперь называется энергией и которую можно определить так, что она всегда сохраняется. В конце XIX века Максвелл писал: «...то, что теперь называют законом сохранения энергии, было неизвестно даже по имени, но оно уже отбрасывало тень на настоящее из глубин будущего».

В современной жизни слово «энергия» мы слышим очень часто. Говорят о высвобождении энергии, о том, что потребление энергии все время растет и ее нехватка сказывается на повседневной жизни и даже на международных отношениях. Говорят об энергии электрических батареек и энергии Солнца, о ядерной энергии, энергии ветра, про энергетическую ценность кефира и шоколада и т. п.

Переходы энергии из одной формы в другую можно обнаружить в любых природных и бытовых явлениях. Самое удивительное заключается в том, что для подсчета каждой из разнообразных форм энергии найдена своя особая формула, и с помощью всех этих формул всякий раз можно убедиться в неизменности суммы всех этих энергий, т. е. в справедливости закона сохранения энергии.

Физики *под энергией понимают способность совершить работу*. Они говорят, что много различных форм энергии существует потому, что есть много способов совершить работу. В 7-м классе вы узнали, что энергия может быть механической (кинетической и потенциальной), внутренней, электрической и другой.

Сейчас вам предстоит систематизировать и углубить свои знания о работе и энергии.

§ 28. Работа силы

Напомним основные сведения о работе, которые вы получили в 7-м классе.

Механическая работа A определяется произведением модуля F силы на пройденное телом расстояние s:

$$A = Fs. \qquad (1)$$

Если направление силы и направление движения тела совпадают, то работа считается положительной. Например, когда тело падает, то действующая на него сила тяжести $\vec{F}_т$ совершает работу, которую можно вычислить по формуле (1). При этом s — путь, пройденный телом по вертикали.

Если тело летит вверх или если мы поднимаем тело на какую-то высоту s, то направление движения и направление силы тяжести противоположны. В этом случае ее работа считается отрицательной:

$$A = -F_т s. \qquad (2)$$

Если же тело перемещается по горизонтальной поверхности, то какой бы путь оно ни прошло, работа силы тяжести, направленной вертикально, равна нулю.

Это все частные случаи. Теперь мы дадим общее определение работы силы.

Работой постоянной силы называют физическую величину, равную произведению модуля силы, действующей на тело, модуля перемещения тела и косинуса угла между направлениями силы и перемещения (рис. 90):

$$\boxed{A = Fs\cos\alpha.} \qquad (3)$$

Убедимся, что формула (3) охватывает все случаи совершения работы силой.

Действительно, когда вектор силы совпадает по направлению с вектором перемещения, угол $\alpha = 0°$, $\cos 0° = 1$ и из формулы (3) получается формула (1).

Если сила противоположна по направлению перемещению, то угол $\alpha = 180°$, $\cos 180° = -1$, и получается формула (2).

В случае, когда направление силы, приложенной к телу, перпендикулярно направлению перемещения тела, угол $\alpha = 90°$, $\cos 90° = 0$ и работа равна нулю.

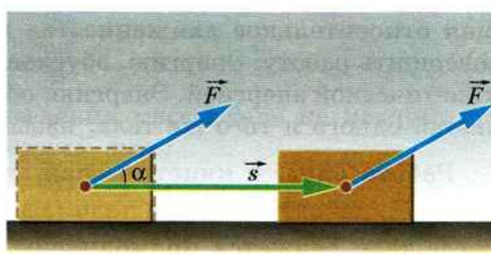


Рис. 90

Формула (3) позволяет вычислить работу силы при любом значении угла α.

Напомним, что единицей работы в СИ является д ж о у л ь:

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

Один джоуль равен работе, которую совершает сила 1 Н при перемещении тела на 1 м по направлению действия силы.

Если на тело действует сразу несколько сил, то по формуле (3) можно подсчитывать и работу каждой из них в отдельности, и работу равнодействующей этих сил. Причина перемещения тела для вычисления работы не имеет значения, важен лишь сам факт перемещения.

Проверьте себя

1. Что такое работа? В каких единицах она выражается?
2. В каких случаях работа положительна? отрицательна? равна нулю?
3. Тело брошено вертикально. Каков знак работы силы тяжести: а) при подъеме тела; б) при его падении?
4. Санки скатываются с горы. Каков знак работы силы трения скольжения?

*5. Совершает ли работу сила тяготения, действующая на искусственный спутник Земли, при его равномерном движении по круговой орбите?

6. Работа силы трения скольжения всегда имеет один и тот же знак. Какой?
7. Мальчик бросил мяч массой 100 г вертикально вверх и поймал его в точке бросания. При движении вверх мяч достиг высоты 5 м. Вычислите работу силы тяжести, действующей на мяч, при движении мяча: а) вверх; б) вниз; в) за все время полета.

§ 29. Взаимосвязь работы и энергии

В общем случае энергия характеризует движение и взаимодействие разных видов материи. Механическая энергия — величина, характеризующая относительное движение тел и их взаимодействие, их способность совершить работу. Энергию, обусловленную движением тела, называют его кинетической энергией. Энергию, обусловленную взаимодействием тел или частей одного и того же тела, называют потенциальной энергией.

Работа силы и кинетическая энергия. Вычислим работу постоянной силы $\vec{F}$, действующей на тело (материальную точку) массой m в случае, когда тело движется прямолинейно и направление силы совпадает с направлением скорости.

Происхождение силы $\vec{F}$ для нас не имеет значения. Например, это может быть сила упругости натянутой веревки (если тело тянут вдоль изображенной на рисунке 91 поверхности) или равнодействующая силы натяжения веревки и силы трения скольжения. Будем, однако, считать, что кроме силы $\vec{F}$ других сил вдоль поверхности на тело не действует, поэтому оно движется равноускоренно, и его ускорение $\vec{a}$ направлено в сторону действия силы $\vec{F}$.

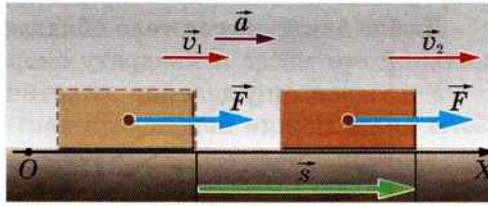


Рис. 91

Пусть тело совершило перемещение $\vec{s}$. В начальной точке наблюдения тело имело скорость $\vec{v}_1$, в конечной — $\vec{v}_2$. Направим координатную ось OX так, чтобы все векторы были сонаправлены с ней (рис. 91). Тогда проекции векторов силы $\vec{F}$, перемещения $\vec{s}$, скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ и ускорения $\vec{a}$ будут равны модулям этих векторов:

$$F_x = F,\ s_x = s,\ v_{1x} = v_1,\ v_{2x} = v_2,\ a_x = a.$$

Напишем для этого случая выражение для работы силы:

$$A = Fs \tag{1}$$

и формулу второго закона Ньютона:

$$F = ma. \tag{2}$$

При прямолинейном равноускоренном движении перемещение тела и скорость связаны соотношением (см. § 10)

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}. \tag{3}$$

Подставив в формулу (1) выражения для F и s из формул (2) и (3), получим:

$$A = ma\frac{v_2^2 - v_1^2}{2a},$$

или

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \tag{4}$$

Величину, равную половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называют *кинетической энергией тела*.

Кинетическая энергия обозначается буквой E_k:

$$\boxed{E_k = \frac{mv^2}{2}.}$$

Любое движущееся тело обладает энергией (кинетической), пропорциональной его массе и квадрату скорости.

Учитывая определение кинетической энергии, выражение (4) для работы силы можно переписать так:

$$\boxed{A = E_{k2} - E_{k1}.} \tag{5}$$

Таким образом, *работа силы (или равнодействующей сил) равна изменению кинетической энергии тела (материальной точки)*. Это утверждение называется *теоремой о кинетической энергии*.

*Кинетическая энергия увеличивается, если работа силы положительна, и уменьшается при отрицательной работе.

При получении формулы (4) мы использовали лишь определение работы и второй закон Ньютона. Никаких предположений о природе силы, действующей на тело, не было сделано. Это может быть сила тяготения, сила упругости или сила трения, а также их равнодействующая. Поэтому теорему о кинетической энергии можно применить, например, к движению санок по наклонной горе, к падению тела вблизи поверхности Земли и других планет, к реактивному движению ракеты в космическом пространстве и во многих других случаях.*

Работа силы тяжести. Вычислим работу внутренних сил системы, состоящей из Земли и поднятого над поверхностью Земли тела.

При небольших расстояниях от поверхности Земли одну из этих сил — силу тяжести — можно считать постоянной и равной

$$\vec{F}_т = m\vec{g},$$

где m — масса тела.

Сила $\vec{F}_т$, действующая на тело, направлена вертикально вниз. Пусть тело свободно падает с высоты h_1 (точка *1*) над каким-то уровнем, от которого мы ведем отсчет высоты, до высоты h_2 (точка *2*) над тем же уровнем (рис. 92, *а*). При этом перемещение тела по модулю равно $h_1 - h_2$, а угол между векторами силы и перемещения равен нулю, поэтому работа силы тяжести оказывается равной

$$A = mg(h_1 - h_2). \tag{6}$$

*Теперь выясним, какую работу совершает сила тяжести в случае, когда тело движется не по вертикали.

Допустим, что тело сначала скользило без трения по наклонной плоскости из положения *1* в положение *3*, а затем перемещалось также без трения по горизонтали из положения *3* в положение *2* (рис. 92, *б*).

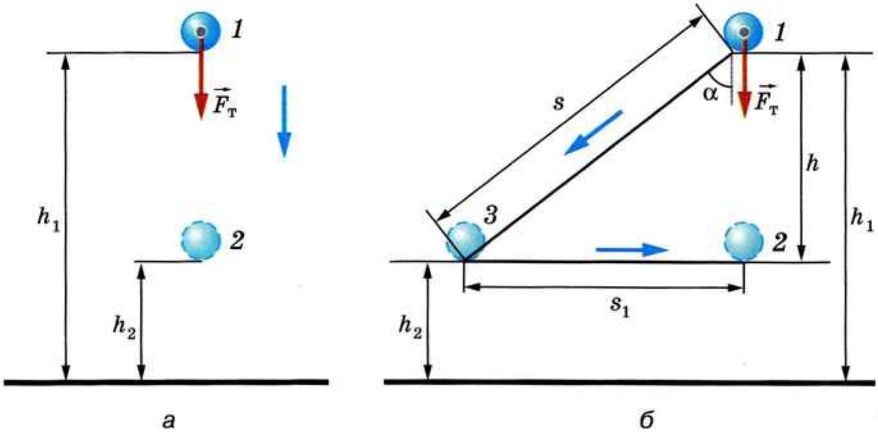


Рис. 92

В этом случае работа силы тяжести равна сумме работ на участке *1—3* и на участке *3—2*:

$$A_{132} = A_{13} + A_{32}.$$

Работа силы тяжести на участке *1—3* равна:

$$A_{13} = mgs\cos\alpha.$$

Но $s\cos\alpha = h$, где $h = h_1 - h_2$, поэтому $A_{13} = mg\,(h_1 - h_2)$.

Работа силы тяжести на участке *3—2* равна:

$$A_{32} = mgs_1 \cos 90° = 0.$$

Таким образом, работа силы тяжести на участке *1—3—2* равна:

$$A_{132} = mg\,(h_1 - h_2).^*$$

Полученный результат показывает, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории движения тела и определяется только его начальным и конечным положением над поверхностью Земли.

Силы, работа которых не зависит от формы траектории, называются *консервативными*. Поэтому сила тяжести и вообще все гравитационные силы консервативны.

Из формулы (6) следует, что независимо от вида траектории движения при спуске тела ($h_1 > h_2$) сила тяжести всегда совершает положительную работу, а при подъеме ($h_2 > h_1$) — отрицательную работу. Если после движения по любой траектории, включающей произвольные подъемы и спуски, тело окажется на исходном уровне ($h_2 = h_1$), то работа силы тяжести равна нулю. При этом начальное и конечное положения тела

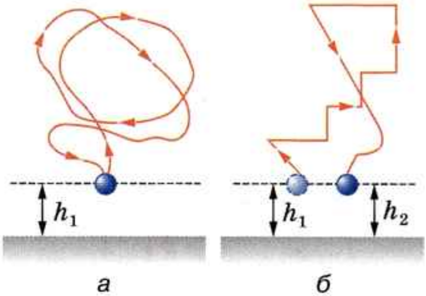


Рис. 93

могут как совпадать (рис. 93, *а*), так и не совпадать (рис. 93, *б*).

Работа силы тяжести и потенциальная энергия. Равенство (6), выражающее работу силы тяжести, действующей на тело, представим в другом виде. Раскрыв скобки и переставив порядок членов в правой части, получим:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (7)$$

Величину, равную произведению массы m тела на ускорение свободного падения g и высоту h тела над поверхностью Земли, называют *потенциальной энергией взаимодействия тела и Земли*. Обозначают потенциальную энергию буквой E_p:

$$\boxed{E_p = mgh.}$$

С учетом этого определения потенциальной энергии выражение для работы (7) запишется так:

$$\boxed{A = -(E_{p2} - E_{p1}).} \quad (8)$$

Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.

Когда сила тяжести совершает положительную работу, то потенциальная энергия взаимодействия Земли и тела уменьшается. При совершении силой тяжести отрицательной работы потенциальная энергия взаимодействия Земли и тела увеличивается.

*Если тело перемещается с высоты h_2 до высоты h_1, то изменение его потенциальной энергии составит

$$E_{p2} - E_{p1} = mgh_2 - mgh_1 = mg(h_2 - h_1) = mg\Delta h.$$

Заметьте, что изменение высоты положения тела (Δh) не зависит от положения уровня, относительно которого отсчитывают сами высоты h_1 и h_2. Этот уровень, соответствующий значению $h = 0$ (его называют *нулевым*), можно выбирать произвольно. Им может быть уровень поверхности моря; дно ямы, вырытой в земле; пол класса или даже поверхность Луны. При любом нулевом уровне значение Δh будет одним и тем же.

Отсюда следует важный вывод, что и *изменение потенциальной энергии $E_{p2} - E_{p1} = mg\Delta h$ не зависит от выбора уровня отсчета высоты.*

Иными словами, для физики имеет смысл не сама потенциальная энергия $E_p = mgh$, а лишь ее изменение.

Получается, что на вопрос о том, какой потенциальной энергией обладает книга, лежащая на столе, каждый из вас может дать свой, отличный от других и в то же время правильный ответ. Стоит только выбрать тот или иной нулевой уровень отсчета высоты, которым может быть и поверхность Земли, и поверхность пола, и поверхность стола. Некоторые получат даже отрицательную энергию, если выберут нулевой уровень на потолке или на крыше. Однако изменение потенциальной энергии книги у всех будет получаться одинаковым.

Как вы помните, выводя формулы (7) и (8), мы хотели вычислить работу внутренних сил системы, состоящей из Земли и поднятого над поверхностью Земли тела. Однако при выводе формул учитывалась работа лишь одной из двух внутренних сил — силы тяжести, действующей на тело. Работа такой же по модулю силы, действующей со стороны тела на Землю, не учитывалась. Почему?

Все дело в выборе тела отсчета, которым мы считали Землю. В этом случае Земля всегда остается неподвижной, т. е. ее перемещение в выбранной системе отсчета заведомо равно нулю. Значит, и работа силы тяготения, действующей на Землю, равна нулю, и учитывать ее не нужно.*

Работа силы упругости. В качестве модели упруго деформируемого тела рассмотрим пружину, показанную на рисунке 94, *а*. Будем считать, что пружина находится в свободном состоянии. Ее левый конец закреплен неподвижно, а правый конец может как растягиваться, так и сжиматься вместе с прикрепленным к нему телом.

Переместим тело вправо, увеличив длину пружины на x_1 (рис. 94, *б*). Если освободить тело, то пружина, сокращаясь, начнет перемещать его в обратном направлении. Вычислим работу силы упругости при изменении длины пружины от x_1 до x_2 (рис. 94, *в*), т. е. на перемещении, модуль которого равен $s = x_1 - x_2$.

Направление силы упругости и перемещения совпадают, поэтому, чтобы найти работу, нужно перемножить модули силы упругости и перемещения. Но нам известно, что сила упругости зависит от деформации пружины, и в данном случае изменяется от $\vec{F_1}$ до $\vec{F_2}$.

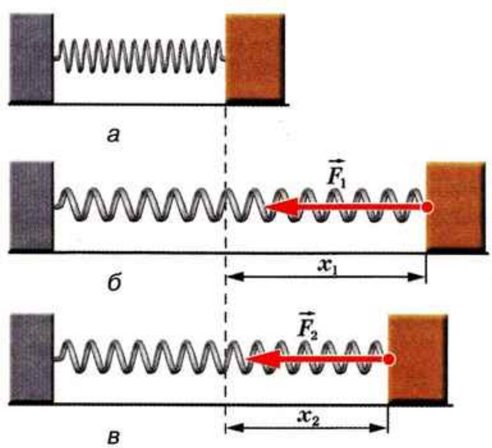


Рис. 94

Так как сила упругости — величина, линейно зависящая от смещения, то для вычисления работы можно взять среднее значение модуля силы:

$$F_{ср} = \frac{F_1 + F_2}{2},$$

где

$$F_1 = kx_1,\ F_2 = kx_2.$$

Поэтому

$$F_{ср} = \frac{kx_1 + kx_2}{2} = \frac{k}{2}(x_1 + x_2).$$

Тогда

$$A = F_{ср}s = \frac{k}{2}(x_1 + x_2)(x_1 - x_2) = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2).$$

Таким образом,

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}. \qquad (9)$$

Мы получили формулу для работы силы упругости в случае сжатия предварительно растянутой пружины (см. рис. 94). Однако ее можно применять и в других ситуациях, например, когда пружина не сжимается, а растягивается. В частности, при растяжении недеформированной пружины ($x_1 = 0$) из формулы (9) получаем

$$A = -\frac{kx_2^2}{2},$$

где x_2 — координата конечного положения конца растянутой пружины. В этом случае работа силы упругости получается отрицательной, так как направления силы упругости пружины и перемещения ее конца противоположны.

Работа силы упругости и потенциальная энергия. Из формулы (9) видно, что работа силы упругости зависит только от координат x_1 и x_2 начального и конечного положений конца пружины, т. е. не зависит от формы траектории, а это значит, что сила упругости является консервативной силой.

Перепишем формулу (9) в таком виде:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \qquad (10)$$

Здесь в правой части равенства стоит *изменение* величины $\frac{kx^2}{2}$, взятое со знаком «минус».

Определяя работу силы тяжести, мы получили формулу

$$A = -(mgh_2 - mgh_1)$$

и величину mgh, изменение которой, взятое с противоположным знаком, равнялось работе силы тяжести, назвали потенциальной энергией поднятого тела. Аналогично, величину $\frac{kx^2}{2}$, изменение которой, взятое с противоположным знаком, равно работе силы упругости, можно назвать *потенциальной энергией деформированной пружины*:

$$\boxed{E_p = \frac{kx^2}{2}.}$$

Формула (10) означает, что *работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии упруго деформированного тела (пружины), взятому с противоположным знаком*.

Заметим еще раз, что потенциальная энергия — это энергия взаимодействия тел. Говоря о потенциальной энергии тела, поднятого на высоту, мы должны помнить, что на самом деле это потенциальная энергия взаимодействия тела и Земли. В случае упруго деформированного тела — это энергия взаимодействия частиц, из которых состоит тело.

Проверьте себя

1. Что такое кинетическая энергия?
2. В чем состоит теорема о кинетической энергии?
3. Тело свободно падает с некоторой высоты. Как изменяется его кинетическая энергия?
4. Как изменяется кинетическая энергия тела, если сила, приложенная к телу, совершает положительную работу?
5. Изменяется ли кинетическая энергия тела при изменении направления вектора его скорости?
6. Что такое потенциальная энергия?
7. Тело падает с некоторой высоты. Как изменяется его потенциальная энергия?
8. Как связана потенциальная энергия тела с работой силы тяжести?
9. Почему работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю? Докажите это.
10. Изменяется ли потенциальная энергия тела при его движении параллельно поверхности Земли?
11. Чему равна работа силы упругости, если тело, на которое она действует, пройдя некоторое расстояние, вернулось в исходную точку?

12. Чему равна потенциальная энергия упруго деформированного тела?
13. Какая работа должна быть совершена для остановки поезда массой 1000 т, движущегося со скоростью 108 км/ч?
14. Груз массой 2,5 кг падает с некоторой высоты. Насколько изменится его потенциальная энергия через 1 с после начала падения? Начальная скорость груза равна нулю. (Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2.)
15. Пружина, растянутая на 2 см, когда ее отпустили, сократилась на 1 см. Определите работу силы упругости, если жесткость пружины равна 40 Н/м.
16. Для расчета кинетической энергии существует единая формула. Почему нет единой формулы для расчета потенциальной энергии?
17. Зависит ли от выбора системы отсчета: а) кинетическая энергия тела; б) потенциальная энергия взаимодействия тела с Землей?

§ 30. Закон сохранения механической энергии

Механическая энергия. Бросим вертикально вверх со скоростью $\vec{v}_0$ тело массой m (рис. 95). В момент броска на тело действовала сила наших мышц, в результате работы которой у тела появилась кинетическая энергия

$$(E_k)_{\max} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

При подъеме скорость тела уменьшается. Следовательно, уменьшается и его кинетическая энергия. Но одновременно, поскольку тело движется вверх, возрастает его потенциальная энергия:

$$E_p = mgh,$$

где h — высота подъема тела.

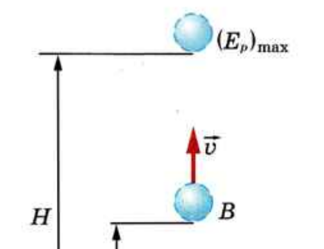


Рис. 95

На максимальной высоте H кинетическая энергия тела равна нулю, а потенциальная энергия достигает максимального значения, равного

$$(E_p)_{\max} = mgH.$$

Но максимальная высота подъема $H = \frac{v_0^2}{2g}$. Подставив это значение высоты в формулу потенциальной энергии, получим

$$(E_p)_{\max} = mgH = mg\frac{v_0^2}{2g} = \frac{mv_0^2}{2} = (E_k)_{\max}.$$

Мы видим, что при подъеме тела на максимальную высоту его кинетическая энергия полностью преобразуется в потенциальную энергию. Верно и обратное: при свободном падении тела на Землю в нижней точке его потенциальная энергия полностью преобразуется в равную ей по модулю кинетическую энергию.

Тела могут обладать и потенциальной, и кинетической энергией одновременно. Например, в рассмотренном нами примере в промежуточных точках траектории тело обладало и потенциальной, и кинетической энергией. Сумму потенциальной и кинетической энергии тела называют его *полной механической энергией*. Ее обозначают обычно буквой E:

$$\boxed{E = E_k + E_p.}$$

***Переход кинетической энергии тела в потенциальную при свободном подъеме тела.** Вычислим полную механическую энергию свободно поднимающегося тела в какой-либо промежуточной точке траектории, например в точке B (см. рис. 95). Потенциальная энергия тела в точке B равна

$$E_p = mgh,$$

а работа силы тяжести при подъеме тела $A = -mgh$, так как высота тела над Землей в этот момент равна h. Кинетическая энергия тела в точке B выразится формулой

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

где v — скорость, которую имеет тело в точке B при подъеме вверх.

Для того чтобы найти значение полной механической энергии в точке B $(E = E_k + E_p)$, воспользуемся теоремой о кинетической энергии. Работа A силы тяжести при подъеме тела до точки B равна изменению кинетической энергии тела: $A = E_k - E_{k0}$ или

$$-mgh = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

В наших обозначениях это равенство имеет вид: $-E_p = E_k - E_{k0}$. Откуда получаем искомый результат: полная механическая энергия тела в точке B равна

$$E = E_k + E_p = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Следовательно, полная энергия тела не зависит от положения точки B свободно поднимающегося тела.

Такое же утверждение нетрудно доказать и для свободно падающего тела, когда происходит превращение его потенциальной энергии в кинетическую.

Таким образом, *полная механическая энергия свободно поднимающегося или свободно падающего тела в любой точке траектории одинакова и равна его кинетической энергии в нижней точке или потенциальной энергии в верхней точке траектории.**

Закон сохранения механической энергии. Допустим, что в замкнутой (изолированной) системе тел, в которой не действуют силы трения и нет неупругих деформаций, внутренние силы в процессе взаимодействия тел совершили работу A. Эта работа приведет к изменению потенциальной и кинетической энергии системы. Выразим работу внутренних сил системы через изменения ее кинетической и потенциальной энергии:

$$A = E_{k2} - E_{k1} \text{ и } A = -\left(E_{p2} - E_{p1}\right).$$

Так как работа A одна и та же, то, приравняв правые части этих равенств, будем иметь:

$$E_{k2} - E_{k1} = -\left(E_{p2} - E_{p1}\right).$$

Сгруппировав члены, относящиеся к одному и тому же состоянию системы, получим

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}.$$

В левой части равенства стоит полная механическая энергия системы в какой-то момент времени (до взаимодействия), а в правой — полная механическая энергия в другой момент времени (после взаимодействия).

В этом состоит *закон сохранения механической энергии*.

В замкнутой системе, в которой действуют только консервативные силы, полная механическая энергия тел сохраняется:

$$\boxed{E = E_k + E_p = \text{const.}}$$

Энергия не создается и не уничтожается, а только превращается из одного вида в другой: из кинетической в потенциальную или наоборот.

Работа силы трения и механическая энергия. Когда на тело действует сила трения скольжения, закон сохранения полной механической энергии нарушается. Например, потенциальная энергия санок, стоящих на вершине горы, больше их кинетической энергии в конце спуска. Уменьшение энергии произошло потому, что на склоне горы на санки действовала и совершала работу сила трения скольжения. Эта сила продолжает действовать на санки и при их движении далее по горизонтальной поверхности. Скорость санок при этом уменьшается, следовательно, уменьшается их кинетическая энергия. Но в потенциальную энергию она не превращается, поэтому полная механическая энергия санок уменьшается. И здесь уменьшение энергии происходит из-за работы силы трения.

Но энергия не исчезает. Часть ее переходит во внутреннюю (немеханическую) энергию соприкасающихся тел, что сопровождается их нагреванием, повышением температуры. Из курса физики 7-го класса вы знаете, что температура тел определяется средней кинетической энергией движения молекул. Тщательные измерения показывают, что кинетическая энергия молекул увеличивается как раз настолько, насколько уменьшается кинетическая энергия трущихся тел. Закон сохранения полной механической энергии может нарушаться, но никогда не нарушается закон сохранения полной энергии. Под полной энергией надо понимать не только механическую энергию, а сумму всех видов энергии — потенциальной, кинетической, внутренней и др.

***Работа внешних сил и механическая энергия.** Рассмотрим теперь незамкнутую систему. Пусть на тело массой m, находящееся на поверхности Земли, начинает действовать внешняя сила $\vec{F_1}$, направленная вертикально вверх и бо́льшая по модулю mg. Происхождение этой силы не имеет значения.

В результате действия силы $\vec{F_1}$ тело поднимается на высоту h (рис. 96). Работа силы $\vec{F_1}$ равна $A = F_1\ h$. При этом потенциальная энергия тела увеличивается на mgh, а изменение кинетической энергии будет равно $E_{k2} - E_{k1}$.

Изменение кинетической энергии тела равно работе, совершаемой равнодействующей сил, действующих на это тело:

$$E_{k2} - E_{k1} = A_р.$$

Здесь $A_р = F_р h$. Так как равнодействующая внешней силы $\vec{F_1}$ и силы тяжести $\vec{F_т} = m\vec{g}$, действующей на тело, равна по модулю $F_р = F_1 - mg$, то $A_р = (F_1 - mg)\ h$, и для изменения кинетической энергии получим:

$$E_{k2} - E_{k1} = F_1 h - mgh.$$

Найдем сумму изменений потенциальной и кинетической энергий:

$$mgh + (F_1 h - mgh) = F_1 h = A.$$

Мы получили важный вывод о том, что *если система тел не является замкнутой, то изменение полной механической энергии тела равно работе внешних сил.**

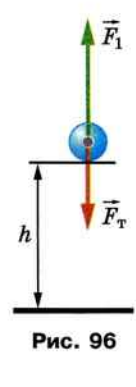


Рис. 96

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Тело свободно падает с высоты 10 м. Какова его скорость на высоте 6 м над поверхностью Земли? Какова скорость в момент падения на землю?

Р е ш е н и е. Изобразим схематически на рисунке три положения тела, о которых идет речь в условии задачи (рис. 97).

В верхней точке (точка A) начальная скорость равна нулю, следовательно, полная механическая энергия в этой точке равна потенциальной энергии тела на высоте $h_0 = 10$ м.

$$E_0 = E_{p0} = mgh_0.$$

В промежуточной точке (точка B) тело обладает и потенциальной, и кинетической энергией. Полная механическая энергия равна:

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1,$$

где $h_1 = 6$ м.

Из закона сохранения энергии следует:

$$E_0 = E_1, \text{ или } mgh_0 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1.$$

Откуда для v_1 получим выражение

$$v_1 = \sqrt{2g(h_0 - h_1)}. \qquad (1)$$

На поверхности Земли (точка C) высота $h_2 = 0$, следовательно, $E_{p2} = 0$, и полная механическая энергия в точке C равна

$$E_2 = E_{k2} = \frac{mv_2^2}{2}.$$

Приравняв E_2 начальному значению механической энергии E_0 (т. е. еще раз применив закон сохранения энергии), получим

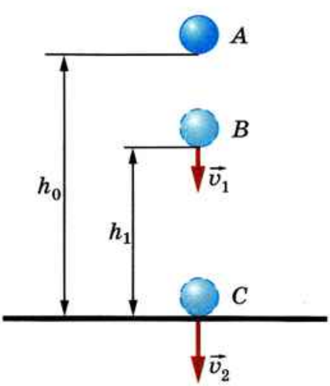


Рис. 97

$$mgh_0 = \frac{mv_2^2}{2},$$

откуда

$$v_2 = \sqrt{2gh_0}. \qquad (2)$$

Подставив в выражения (1) и (2) данные условия задачи, найдем:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4\ \text{м}} \approx 8{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot 9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 10\ \text{м}} = 14\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

О т в е т: $v_1 \approx 8{,}8$ м/с, $v_2 = 14$ м/с.

Проверьте себя

1. Что такое полная механическая энергия?
2. В чем состоит закон сохранения механической энергии?
3. При каких условиях полная механическая энергия системы тел сохраняется?
4. В какой вид энергии преобразуется часть полной механической энергии при трении взаимодействующих тел?
5. Выполняется ли закон сохранения полной механической энергии, если на тела системы действуют внешние силы?
6. Тело массой 2 кг падает с высоты 30 м над поверхностью Земли. Вычислите кинетическую энергию тела в момент, когда оно находится на высоте 15 м над поверхностью Земли и в момент падения на землю.
7. Автомобиль массой 2 т затормозил и остановился, пройдя путь 50 м. Определите работу силы трения и изменение кинетической энергии автомобиля, если дорога горизонтальна, а коэффициент трения равен 0,4.

§ 31. Равновесие и потенциальная энергия

Механическим *равновесием* называют такое состояние тела (сооружения), при котором это тело относительно выбранной системы отсчета сохраняет состояние покоя. Систему отсчета при инженерных расчетах обычно связывают с Землей или телами, неподвижными относительно нее.

Вопросы равновесия очень важны для строителей, проектировщиков машин, артистов цирка, спасателей. Да и в повседневной жизни время от времени каждому из нас приходится сталкиваться с понятием равновесия.

Не должны опрокидываться опоры, ползти прислоненные к стене лестницы, выскальзывать из-под ножа разрезаемые предметы. Разобраться с условиями, при выполнении которых тело находится в равновесии, проще всего, если тело можно считать материальной точкой. С этого случая мы и начнем знакомство с разделом механики, называемым *статикой* — наукой о равновесии тел.

Материальная точка находится в состоянии покоя, если равнодействующая всех сил, действующих на нее, равна нулю. Это следует из второго закона Ньютона. Равновесием является не только состояние покоя. Тело может двигаться равномерно и прямолинейно. При таком движении тело также находится в состоянии равновесия.

Равновесие может быть различным в зависимости от расположения тела по отношению к окружающим телам. Поясним это с помощью простых

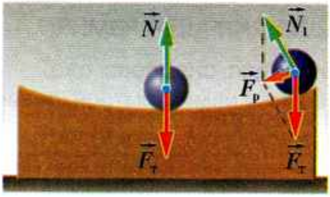


Рис. 98

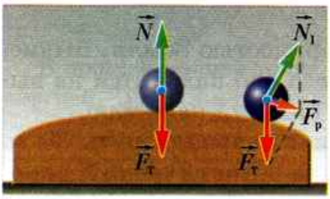


Рис. 99

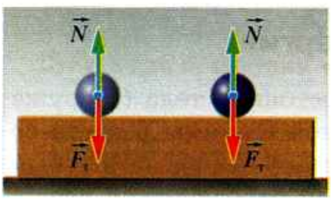


Рис. 100

примеров. Пусть шарик занимает нижнее положение на вогнутой подставке (рис. 98). В этом положении он находится в равновесии. Сместим немного шарик из этого положения, например, вправо и отпустим. Он сразу же соскользнет в первоначальное положение.

Объяснить это можно так: в отклоненном положении сила тяжести $\vec{F}_т$ и реакция опоры $\vec{N}_1$, действующие на шарик, не уравновешиваются. Из рисунка 98 видно, что их равнодействующая $\vec{F}_р$ направлена к положению равновесия (т. е. возвращает шарик в это положение). Такое равновесие называют *устойчивым*.

Шарик, расположенный в верхней точке выпуклой подставки (рис. 99), также находится в равновесии, так как сумма силы тяжести и реакции опоры равна нулю. Но если сместить его из этого положения, то он в него не вернется. Равнодействующая в этом случае направлена так, что она еще дальше перемещает тело от положения равновесия. Такое равновесие называют *неустойчивым*.

Если смещать шарик по гладкой горизонтальной поверхности, то он остается в равновесии. Такое равновесие называют *безразличным*. Оно сохраняется при всех перемещениях тела (рис. 100).

Проанализируем эти примеры с энергетических позиций. Нетрудно заметить, что в первых двух случаях шарик, выведенный из положения равновесия, уменьшает свою потенциальную энергию, т. е. он самопроизвольно «стремится» занять положение, при котором его потенциальная энергия минимальна.

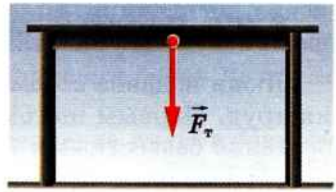
В том случае, когда потенциальная энергия шарика в положении равновесия была меньше его потенциальной энергии в близлежащих точках, положение равновесия было устойчивым. В случае же, когда потенциальная энергия шарика в близлежащих точках была меньше, чем в точке равновесия, то это положение оказалось неустойчивым.

Следовательно, *устойчиво то положение тела, в котором его потенциальная энергия имеет минимальное значение*.

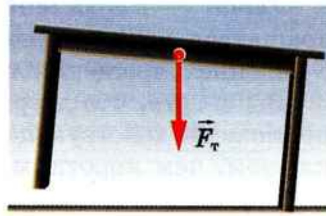
Условие устойчивости положения равновесия остается справедливым и для стола, опирающегося на несколько точек (рис. 101, *а*), и для тела, опирающегося на целую площадку (например, ящик на полу). При отклонении стола (рис. 101, *б*) от его положения устойчивого равновесия центр тяжести поднимается, и потенциальная энергия стола увеличивается.

В случаях, когда тело имеет несколько точек опоры, условие устойчивого равновесия заключается в том, чтобы вертикаль, проведенная через центр тяжести, пересекала поверхность, ограниченную контуром, соединяющим точки опоры.

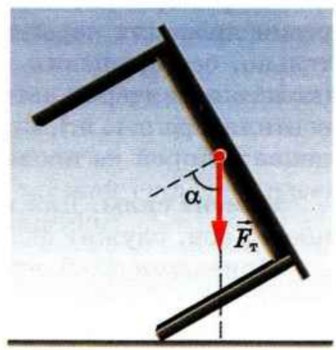
Поднимем одну из сторон стола так, чтобы после поворота вокруг двух опорных ножек вертикаль, проходящая через центр тяжести, вышла за границы поверхности опоры (рис. 101, *в*). При дальнейшем повороте центр тяжести стола начнет опускаться, равновесие не восстановится, и стол опрокинется.



а



б



в

Рис. 101

Проверьте себя

1. Каково условие равновесия тела (материальной точки)?
2. Какое равновесие называют устойчивым? неустойчивым? безразличным?
3. Приведите примеры устойчивого, неустойчивого и безразличного равновесия.
4. Справедливо ли утверждение: «Равновесие тела устойчивое, если в этом положении тело обладает минимальной потенциальной энергией»?
5. Какое из трех положений кирпича, показанных на рисунке 102, устойчиво?
6. При каком условии устойчиво положение тела, имеющего несколько точек опоры?
7. Житейский опыт показывает, что невысокий человек чувствует себя в автобусе устойчивее высокого, а человек с тяжелыми сумками в руках — устойчивее человека без сумок. Почему?

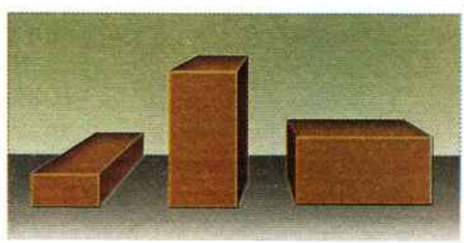


Рис. 102

§ 32. Простые механизмы

Люди издавна стремились изобрести устройства, которые облегчили бы их труд. Первым шагом на этом пути в незапамятные времена стало изобретение безвестными гениями простых механизмов: приспособлений для преобразования силы и движения. Самый древний механизм, позволивший сделать человека сильнее, — это рычаг — палка, которую взял в свои руки наш далекий предок.

Рычаг — в простейшем варианте — это твердый стержень, способный вращаться вокруг неподвижной опоры. Так как вы еще не встречались с явлением вращения твердого тела, то следует с ним познакомиться.

Вы знаете, что дверь тем легче открыть, чем дальше от оси вращения приложена действующая на дверь сила. Гайки легче отвернуть длинным ключом, чем коротким.

Эти и другие подобные примеры показывают, что результат действия силы на твердое тело зависит не только от модуля силы и ее направления, но и от того, где приложена сила.

Например, если сила приложена так, что продолжение линии ее действия проходит через центр масс, тело будет двигаться только поступательно, без вращения. Если тело закреплено и может вращаться на оси (колесо или дверца автомобиля, дужка очков, колодезный ворот, лопасти вентилятора и т. п.), приведет его во вращение только такая сила, направление которой не проходит через ось.

Момент силы. Для характеристики действия силы на тело, закрепленное на оси, служит физическая величина — момент силы.

Моментом силы относительно оси вращения называют величину, равную произведению модуля силы, вращающей тело, на кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы:

$$\boxed{M = Fl,}$$

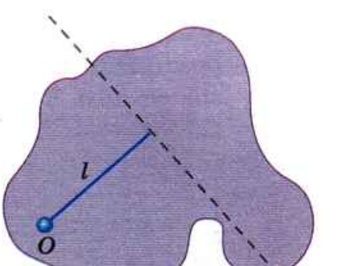


Рис. 103

где M — момент силы, F — модуль силы, l — расстояние от оси вращения до линии действия силы (рис. 103).

Величина l имеет особое название. Ее называют *плечом силы*. Плечо силы — это длина перпендикуляра, опущенного из точки опоры O (через нее проходит ось вращения) на линию действия силы.

Чем больший момент относительно оси вращения создает сила, приложенная к телу, тем легче с ее помощью тело повернуть. Для увеличения момента не обязательно увеличивать модуль силы. Вместо этого достаточно увеличить плечо силы. *Сила, момент которой относительно оси вращения равен нулю, не вызывает вращения относительно этой оси.*

Из выражения $M = Fl$ следует, что единицей момента силы в Международной системе единиц является момент силы, создаваемый силой 1 Н, плечо которой равно 1 м. Эта единица называется ньютон-метром (Н · м).

Условие равновесия рычага. Теперь мы можем выяснить, какой выигрыш дает применение рычага. В этом нам поможет опыт.

Если подвешивать к рычагу-планке разные грузы по обе стороны от точки опоры (рис. 104), то можно наблюдать, что в одних случаях под действием приложенных сил рычаг будет вращаться, а в других — находиться в равновесии.

На доску качелей двое детей могут сесть так, что один конец сразу же опустится вниз, а другой поднимется вверх. Но можно сесть и так, что качели останутся в равновесии.

Как в отношении качелей, так и в отношении любого рычага для этого нужны, по крайней мере, две силы, которые, действуя в отдельности, поворачивают рычаг в противоположных направлениях.

Если проделать опыт по рисунку 104 несколько раз, уравновешивая на рычаге грузы, расположенные по разные стороны от оси вращения, то можно прийти к выводу: *рычаг находится в равновесии под действием двух сил, если момент силы, вращающей его по часовой стрелке, равен моменту силы, вращающей его против часовой стрелки*:

$$\boxed{M_1 = M_2.} \qquad (1)$$

Так как $M_1 = F_1 l_1$, а $M_2 = F_2 l_2$ (рис. 105), то $F_1 l_1 = F_2 l_2$, откуда получается следующее соотношение:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}, \qquad (2)$$

т. е. *для равновесия рычага необходимо, чтобы силы, действующие на него, были обратно пропорциональны плечам этих сил.*

Таким образом, чтобы уравновесить меньшей силой бóльшую силу, необходимо, чтобы ее плечо

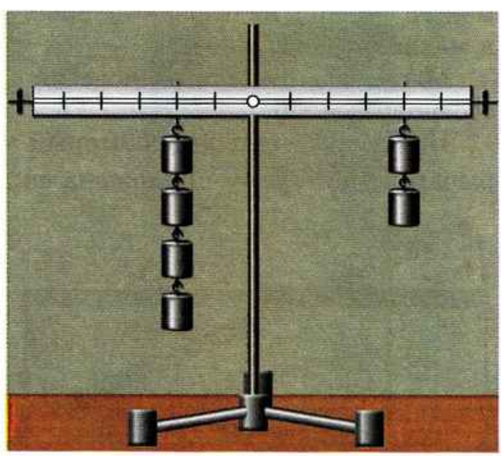


Рис. 104

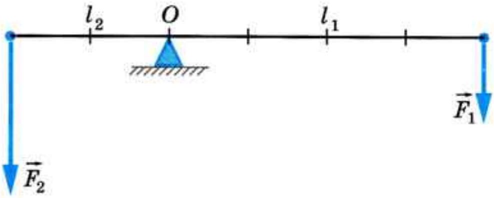


Рис. 105

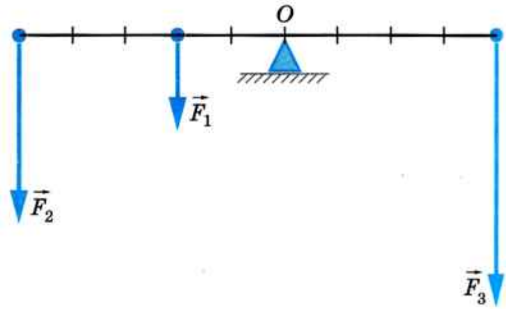


Рис. 106

превышало плечо большей силы. Выигрыш в силе, получаемый с помощью рычага, определяется отношением плеч приложенных сил.

Можно показать, что формула (1), выражающая *правило моментов*, справедлива для любого твердого тела, способного вращаться вокруг закрепленной оси, и не только для двух действующих сил (рис. 106).

В общем случае правило моментов формулируется так:

Тело, которое может вращаться вокруг неподвижной оси, находится в равновесии, если сумма моментов сил, вращающих тело по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, вращающих тело против часовой стрелки.

*«**Золотое правило» механики.** Древним ученым было известно правило, применимое ко всем простым механизмам. Оно получило название «золотого правила» механики. Это правило позволяет ответить на вопрос, можно ли при пользовании простыми механизмами получить выигрыш в механической работе.

Мы знаем, что для равновесия рычага необходимо, чтобы выполнялось соотношение (2).

Повернем рычаг на некоторый малый угол (рис. 107). При этом конец рычага, к которому приложена сила $\vec{F_1}$, переместится на расстояние s_1, а другой конец — на расстояние s_2. Так как угол мал, модули перемещений можно считать равными длинам дуг.

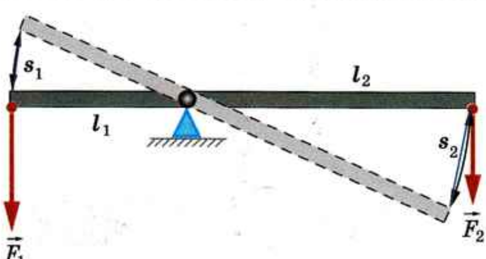


Рис. 107

Из рисунка видно, что модули перемещений пропорциональны плечам рычага:

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{l_2}{l_1}. \qquad (3)$$

Подставив в равенство (2) вместо отношения плеч равное ему отношение модулей перемещений, получим

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{s_2}{s_1}. \qquad (4)$$

Запишем полученную пропорцию в виде равенства

$$F_1 s_1 = F_2 s_2. \qquad (5)$$

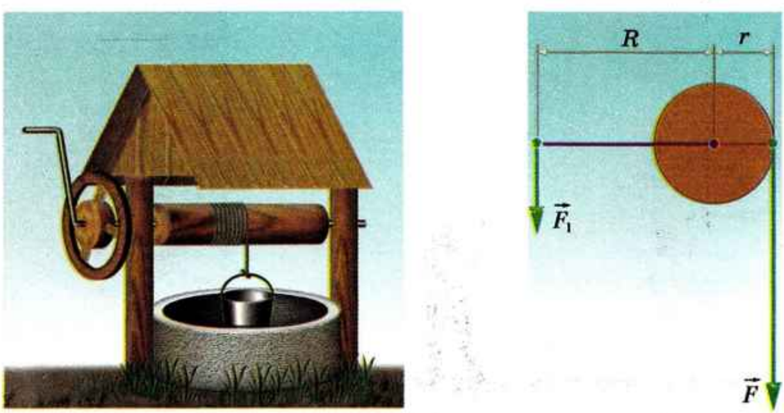
Мы знаем, что работа силы определяется произведением модуля силы, модуля перемещения и косинуса угла между направлениями векторов силы и перемещения.

Для левого конца рычага можно считать, что угол равен 180°, а для правого — нулю, поэтому произведение $F_1 s_1$ представляет собой по модулю работу силы $\vec{F_1}$, а произведение $F_2 s_2$ — работу силы $\vec{F_2}$. Следовательно, работы сил $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$, как видно из формулы (5), равны по модулю.

Мы доказали, что рычаг не дает выигрыша в работе. Впрочем, этот вывод непосредственно следует и из закона сохранения энергии. Когда левый конец рычага приподнимается, его потенциальная энергия возрастает, а правого конца уменьшается (он опускается). Так как при повороте уравновешенного рычага его энергия не меняется, изменения энергии правой и левой части равны (по модулю). А это значит, что равны (по модулю) работы, совершаемые обеими силами.

Рычаги находят широкое применение как в технике (например, подъемные краны), так и в быту (ножницы, кусачки, весы и т. д.).*

Ворот (рис. 108, *а*) — это своеобразный рычаг (рис. 108, *б*). Рычаг будет в равновесии, если момент силы $\vec{F_1}$, с которой действуют на рукоятку,



а *б*

Рис. 108

относительно оси вращения создает момент, равный моменту силы $\vec{F}$, действующей на вал ворота (она по модулю равна силе тяжести, действующей на ведро с водой):

$$F_1R = Fr,$$

где R — плечо силы $\vec{F_1}$, r — плечо силы $\vec{F}$. Откуда

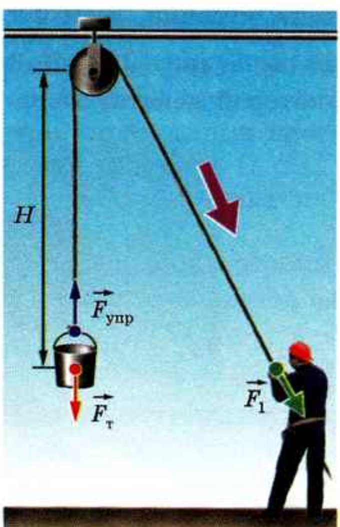
$$\frac{F}{F_1} = \frac{R}{r},$$

т. е. при отсутствии сил трения выигрыш в силе равен отношению длины рукоятки к радиусу вала.

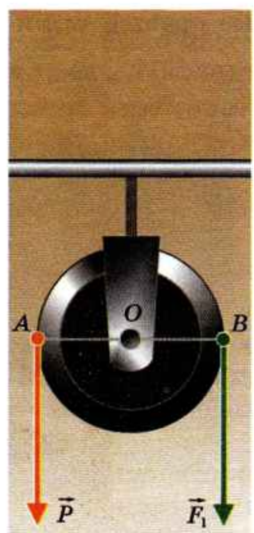
Для увеличения выигрыша нужно увеличивать плечо рукоятки и уменьшать радиус вала. Однако слишком удалять рукоятку неудобно, а при уменьшении радиуса вала пропорционально будет уменьшаться и длина троса, наматываемого на вал за один оборот. Так что, пытаясь получить выигрыш в силе, проигрываешь в числе оборотов, необходимых для подъема воды.

Неподвижный блок (рис. 109, *а*). Ось неподвижного блока закреплена и при подъеме грузов не изменяет своего положения.

Длина выбираемой человеком веревки равна высоте H подъема груза, поэтому работа силы мышц человека $A_1 = F_1H$ (см. рис. 109, *а*). Работа же силы упругости $\vec{F}_{упр}$, действующей со стороны веревки на поднимаемый



а



б

Рис. 109

груз, равна $A = F_{упр}H$. Без учета работы сил трения $A_1 = A$, значит, $F_1 = F_{упр}$. Но сила упругости по модулю равна весу груза (третий закон Ньютона): $F_{упр} = P$. Следовательно, неподвижный блок выигрыша в силе не дает: $F_1 = P$.

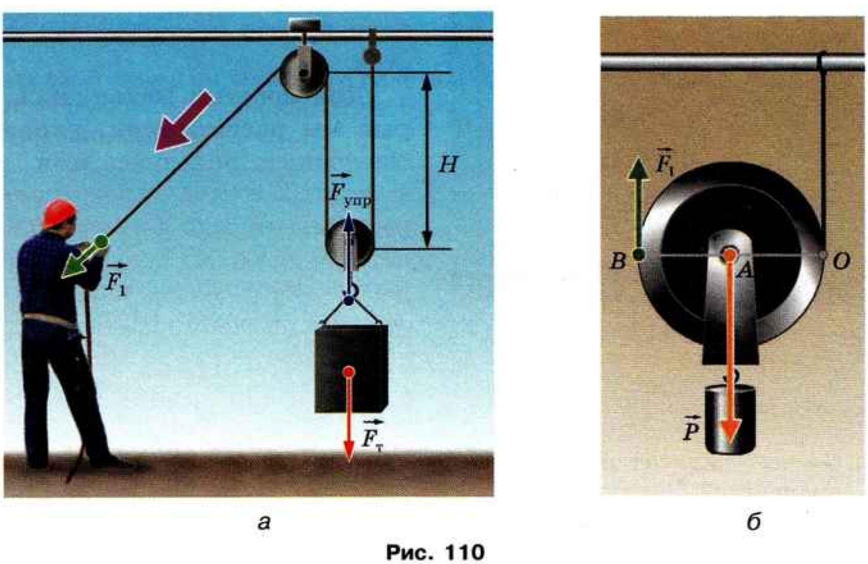
Тот же результат нетрудно получить с помощью правила моментов и рисунка 109, *б*. Сделайте это самостоятельно.

Неподвижный блок применяют для изменения направления действия силы, например он позволяет поднимать груз, стоя на земле (см. рис. 109, *а*).

Подвижный блок — это блок, который поднимается и опускается вместе с грузом (рис. 110, *а*). Учитывая, что для подъема груза на высоту H свободный конец троса должен удлиниться на $2H$, получим, что работа силы мышц человека $A_1 = F_1 \cdot 2H$.

Работа силы упругости $\vec{F}_{упр}$ равна $A = F_{упр}H$. Без учета работы сил трения $A_1 = A$, значит, $F_1 = \frac{F_{упр}}{2}$. Но сила упругости по модулю равна весу груза (третий закон Ньютона): $F_{упр} = P$. Следовательно, подвижный блок дает выигрыш в силе в два раза: $F_1 = \frac{P}{2}$. Однако при этом приходится проигрывать в расстоянии во столько же раз.

На рисунке 110, *б* показан соответствующий подвижному блоку рычаг: O — точка опоры рычага, AO — плечо силы $\vec{P}$ ($\vec{P}$ — вес груза),



а *б*

Рис. 110

OB — плечо силы $\vec{F_1}$ ($\vec{F_1}$ — сила, которую прикладывают к свободному концу троса). С помощью правила моментов докажите, что $F_1 = \frac{P}{2}$.

Наклонная плоскость. Применим закон сохранения энергии к расчету силы, которую нужно приложить, чтобы равномерно поднять тело массой m по наклонной плоскости длиной L на высоту H (рис. 111). Трение не учитываем.

При движении тела по наклонной плоскости сила $\vec{F_1}$ совершает работу $A = F_1L$ (угол между направлениями вектора силы и вектора перемещения тела равен нулю). Поскольку тело движется равномерно, то единственным результатом работы силы (это внешняя сила) является увеличение потенциальной энергии тела:

$$A = E_{p2} - E_{p1} = mgH = F_тH.$$

Следовательно, $F_1L = F_тH$. Откуда

$$\frac{F_1}{F_т} = \frac{H}{L},$$

т. е. при отсутствии сил трения наклонная плоскость дает выигрыш в силе во столько раз, во сколько раз длина наклонной плоскости больше ее высоты.

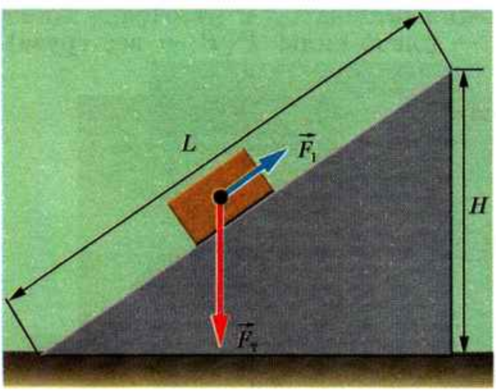


Рис. 111

Наклонной плоскостью часто пользуются на практике, чтобы втащить груз на некоторую высоту, если просто поднять груз не удается.

Для простых механизмов, которые мы рассмотрели, характерно следующее: пользуясь ими, можно выиграть или в силе (проиграв в расстоянии), или в расстоянии (проиграв в силе), но нельзя выиграть в работе. Этот вывод и представляет собой «золотое правило» механики.

Проверьте себя

1. От чего зависит действие силы на тело, имеющее закрепленную ось вращения?
2. Что такое момент силы?
3. Что такое плечо силы?

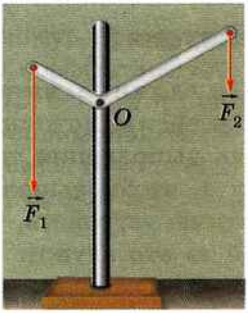


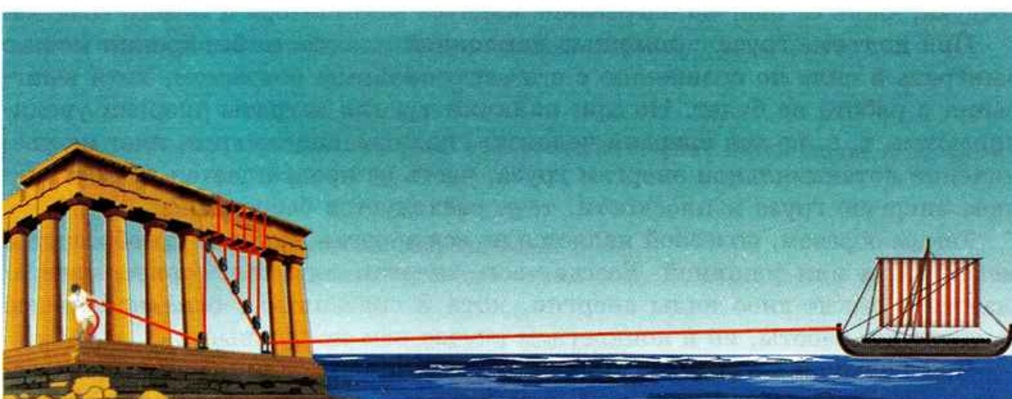
Рис. 112

Рис. 113

4. На рисунке 112 показан рычаг, на который действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. O — точка опоры. Изобразите плечи этих сил.
5. В чем состоит условие равновесия рычага?
6. В чем состоит правило моментов?
7. Напишите условие равновесия рычага, схематически изображенного на рисунке 106.
8. Объясните, как действуют весы (рис. 113).
9. Во сколько раз выигрывают в силе, пользуясь подвижным блоком?
10. Какой выигрыш в силе дает наклонная плоскость?
11. В чем состоит «золотое правило» механики?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Подвижный блок дает выигрыш в силе при подъеме груза в два раза. Архимед придумал такую сложную комбинацию блоков, что с ее помощью один человек смог буксировать галеру.



§ 33. Коэффициент полезного действия

Любые механизмы и машины, простые или сложные, выполняют роль преобразователей энергии: они передают энергию источника другим телам. Можно сказать и иначе: зачастую для выполнения той или иной работы человеку не хватает собственных сил и, чтобы выполнить эту работу, ему приходится прибегать к использованию устройств, увеличивающих прилагаемую силу. Неизбежной платой за это служит проигрыш в пути, но, тем не менее, работу удается выполнить.

Однако при использовании любых механизмов всегда возникают потери, связанные с необходимостью приведения в действие самих машин и механизмов. Рассмотрим такой пример. Зимней ночью выпал снег, и дворник, вооружившись большой лопатой, расчищает дорожку к школьному крыльцу. Вся ли производимая им работа является полезной? Очевидно, нет. Полезной является только та ее часть, за счет совершения которой происходит перемещение снега. Но вместе со снегом дворнику приходится перемещать и лопату, т. е. механизм, которым он пользуется для сокращения времени работы. А ведь на перемещение лопаты тоже должна совершаться работа, и чем тяжелее лопата, тем больше энергии дворник тратит для «повышения эффективности» своего труда. Точно так же, поднимая из колодца ведро с водой, вы всякий раз затрачиваете энергию не только на подъем воды (это — полезная работа), но и на подъем ведра, а заодно и троса, привязанного к ведру. В этих и подобных им случаях реально совершаемая работа всегда больше полезной.

Во многих случаях часть энергии, преобразуемой используемым механизмом, превращается во внутреннюю энергию: из-за повсеместно присутствующего трения тела нагреваются. Так, при использовании вентилятора не вся энергия электрического тока превращается в энергию струи воздуха, часть ее идет на нагревание корпуса вентилятора и самого воздуха.

При подъеме груза с помощью наклонной плоскости без трения можно выиграть в силе по сравнению с его вертикальным подъемом, хотя выигрыша в работе не будет. Но при наличии трения затраты энергии увеличиваются, т. е. не вся энергия человека, поднимающего груз, идет на увеличение потенциальной энергии груза, часть ее превращается во внутреннюю энергию груза и плоскости, т. е. расходуется бесполезно.

Таким образом, полезной является не вся энергия, которая преобразуется механизмом или машиной. Всегда часть энергии теряется, вернее, превращается в какие-либо виды энергии, хотя и связанные с основной целью выполнения работы, но в конкретном случае нам не нужные.

Чем большая часть энергии, подводимой к механизму (машине, двигателю), преобразуется в полезный вид энергии, тем эффективнее его работа.

Эффективность преобразования энергии характеризуется специальной величиной — коэффициентом полезного действия (сокращенно КПД). Обозначается КПД буквой η (читается: «эта»).

Коэффициентом полезного действия механизма или машины называют величину, равную отношению полезно преобразованной энергии к полной энергии, полученной механизмом или машиной:

$$\boxed{\eta = \frac{E_п}{E},} \qquad (1)$$

где $E_п$ — полезно преобразованная энергия, E — полная энергия, полученная механизмом или машиной от источника энергии.

Иногда энергию вычислить трудно. Тогда для вычисления КПД можно использовать понятие работы как величины, определяющей изменение энергии, и формула для КПД будет иметь вид:

$$\boxed{\eta = \frac{A_п}{A},} \qquad (2)$$

где $A_п$ — полезно совершенная работа, A — полная работа, которую приходится совершить, применяя механизм.

Коэффициент полезного действия принято выражать в процентах. В этом случае значение КПД, полученное с помощью формулы (1) или (2), надо умножить на 100%.

КПД всегда меньше единицы (меньше 100%), так как в формулах (1) и (2) числитель всегда меньше знаменателя.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Кран равномерно поднимает груз массой 200 кг на высоту 50 м за время 2 с. Мощность двигателя крана равна 10 кВт. Определите КПД двигателя.

Решение. Для вычисления КПД используем формулу

$$\eta = \frac{E_п}{E}.$$

Полезным использованием энергии является увеличение потенциальной энергии груза:

$$E_п = mgh,$$

так как начальная потенциальная энергия равна нулю.

Энергия, получаемая двигателем от источника энергии, равна работе тока:

$$E = A.$$

За счет этой работы двигатель развивает мощность

$$N = \frac{A}{t}.$$

Следовательно,

$$E = Nt.$$

Для КПД двигателя получается выражение:

$$\eta = \frac{mgh}{Nt}.$$

Используя данные задачи, выполним вычисления:

$$\eta = \frac{2000\ \text{кг} \cdot 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 50\ \text{м}}{10^4\ \text{Вт} \cdot 120\ \text{с}} = 0{,}81.$$

Выразим КПД в процентах: $\eta = 81\%$.

Ответ: КПД двигателя равен 81%.

Проверьте себя

1. Что такое коэффициент полезного действия механизма?
2. Почему КПД машин и механизмов не может быть равен единице?
3. С помощью наклонной плоскости поднимают груз на некоторую высоту. КПД наклонной плоскости равен 95%. Что это означает?
4. Как можно увеличить КПД?

*5. На коротком плече рычага подвешен груз массой 100 кг. Для его подъема к длинному плечу приложили силу 250 Н. Преодолевая трение, груз равномерно подняли на высоту 0,08 м, при этом точка приложения силы опустилась на 0,4 м. Определите КПД рычага.

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 8

1. **Работа силы** — это скалярная величина, равная произведению модуля силы, приложенной к телу, модуля перемещения и косинуса угла между направлениями векторов силы и перемещения.
2. Энергию движущегося тела называют **кинетической энергией**. Кинетическая энергия определяется по формуле $E_k = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса движущегося тела; v — скорость движения.
3. Изменение кинетической энергии тела равно работе силы (равнодействующей сил), приложенной к телу.
4. Энергию взаимодействия тел или частей тела называют **потенциальной энергией**. Потенциальная энергия тела, поднятого над Землей, равна $E_p = mgh$, где m — масса тела, h — высота над уровнем, принятым за нулевой; g — ускорение свободного падения. Потенциальная энергия упругодеформированной пружины равна $\frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины, x — ее удлинение.

5. Работа силы тяжести или силы упругости равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.
6. В замкнутой системе взаимодействующих тел, если в ней действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется.
7. Если система незамкнутая, то изменение механической энергии равно работе внешних сил.
8. Тело, которое можно считать материальной точкой, находится в равновесии, если равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна нулю.
9. Моментом силы относительно оси вращения называют произведение модуля силы, вращающей тело, на кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы (плечо).
10. Твердое тело, способное вращаться вокруг закрепленной оси, находится в равновесии, если сумма моментов сил, вращающих тело по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, вращающих тело против часовой стрелки.
11. Простыми механизмами называют устройства, преобразующие движение одного или нескольких тел в движение других тел. К ним относятся рычаг, блок, наклонная плоскость и др.
12. «Золотое правило» механики утверждает, что ни один механизм выигрыша в работе не дает.
13. Коэффициент полезного действия механизма или машины равен отношению полезно преобразованной энергии к полной энергии, полученной от источника энергии.

глава 9

ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА

Гидро- и аэростатика — раздел механики, в котором изучаются условия равновесия жидкостей и газов, а также действие неподвижных жидкостей и газов на находящиеся в них тела.

Как и все материальные тела, жидкости и газы подчиняются законам Ньютона. Но при их использовании следует учитывать специфические свойства этих тел. Напомним их.

Газы заполняют весь сосуд, в котором они находятся; их легко сжать; предоставленные самим себе, они стремятся к неограниченному расширению, т. е. газы не сохраняют ни формы, ни объема, как бы велик он не был. Газы никогда не образуют свободной поверхности. Плотность газов в обычных условиях примерно в тысячу раз меньше плотности жидкостей. Например, масса воздуха в объеме 1 м^3 равна всего 1,3 кг, а масса воды того же объема равна 1 т. В то же время в кислородных баллонах, применяемых при сварке, кислород сжат до давления, в 150 раз превышающего атмосферное. Плотность кислорода при этом также увеличена в 150 раз — примерно до плотности пробки.

Жидкости принимают форму сосуда, в котором находятся, но сохраняют свой объем. Чтобы объем жидкости уменьшился на 1%, давление должно увеличиться в сотни и даже в тысячи раз. На границе с газом или паром жидкости образуют свободную поверхность. Жидкости текучи — их можно переливать из одного сосуда в другой. Части жидкости могут свободно сдвигаться относительно друг друга. Достаточно, например, слегка подуть на поверхность жидкости, чтобы вызвать ее движение. Подвижностью жидкости объясняется то, что свободная поверхность спокойной жидкости всегда горизонтальна, т. е. перпендикулярна направлению силы тяжести. По той же причине жидкость всегда стекает в любые углубления, занимая состояние устойчивого равновесия, при котором ее центр тяжести находится в самом низком положении.

§ 34. Давление внутри покоящейся жидкости

Расчет давления. Повседневный опыт учит нас, что жидкости действуют на стенки сосудов, в которых они находятся. Эти силы называются *силами давления жидкости*.

а *б*

Рис. 114

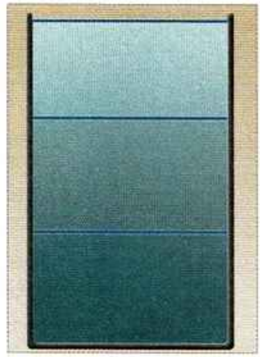


Рис. 115

Прикрывая пальцем отверстие открытого водопроводного крана, мы ощущаем давление жидкости на палец. Погружая ногу в резиновом сапоге в воду, мы чувствуем, как вода сдавливает сапог. Любой прибор, опускаемый в глубины океана для изучения его свойств, должен быть заключен в очень прочный корпус, чтобы силы давления не раздавили его. По той же причине корпус подводной лодки делают намного прочнее подводной части надводных судов.

Почему возникают силы давления? Проделаем опыт.

Возьмем стеклянный цилиндр, нижнее основание которого затянуто тонкой резиновой пленкой. Налив в цилиндр воду, заметим, что резиновая пленка прогнулась (рис. 114, *а*). Если увеличить высоту столба жидкости, то пленка прогнется больше (рис. 114, *б*). Для объяснения этого явления мысленно разделим столб воды на слои (рис. 115). Жидкость находится под действием силы тяжести и на нижние слои действует вес верхних ее слоев. Чем глубже расположен слой жидкости, тем большим оказывается давление, вызванное действием веса вышележащих слоев жидкости. Наибольшим давление будет у дна сосуда.

Вы знаете, что силы, возникающие при непосредственном соприкосновении и деформации тел, называются силами упругости. Таким образом, силы давления в жидкостях — это силы упругости, возникающие в результате деформации нижележащих слоев слоями, находящимися над ними.

Давление, оказываемое покоящейся жидкостью, называют *гидростатическим*.

Напомним, что давлением называют физическую величину, равную отношению модуля силы $\vec{F}$, действующей перпендикулярно поверхности, к площади S этой поверхности:

$$p = \frac{F}{S}.$$

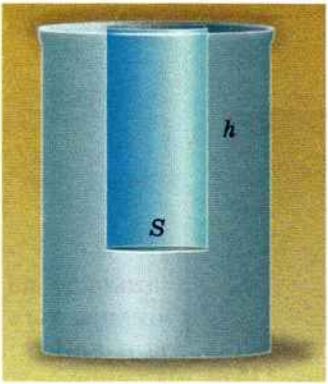


Рис. 116

В СИ давление выражают в **паскалях** (Па):

$$1\ \text{Па} = 1\ \text{Н/м}^2.$$

Один паскаль — это давление, создаваемое силой 1 Н, действующей на поверхность площадью 1 м² перпендикулярно этой поверхности.

Получим формулу для расчета гидростатического давления жидкости на произвольной глубине h. Для этого выделим мысленно вертикальный столб жидкости высотой h, основанием которого служит площадка площадью S (рис. 116). Сила, с которой столб жидкости действует на площадку, представляет собой вес столба жидкости: $F = P$. Но вес этого столба по модулю равен действующей на него силе тяжести:

$$P = mg.$$

Масса, как вы знаете из курса физики 7-го класса, может быть найдена по формуле

$$m = \rho V,$$

где ρ — плотность жидкости, а V — ее объем ($V = Sh$).

Следовательно,

$$F = \rho Shg.$$

Так как давление $p = \frac{F}{S}$, то для давления, производимого столбом жидкости на его основание, получим

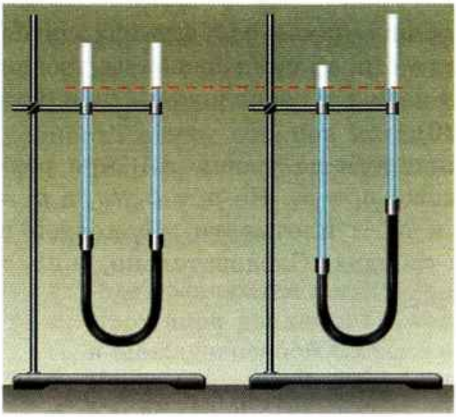
$$p = \frac{\rho hg}{S} = \rho gh,$$

т. е.

$$\boxed{p = \rho gh.}$$

Из формулы видно, что *гидростатическое давление на любой глубине внутри жидкости зависит только от плотности жидкости, ускорения свободного падения и глубины, на которой определяется давление.*

Сообщающиеся сосуды. Соединим две стеклянные трубки резиновым шлангом и наполним водой (рис. 117, *а*). Сосуды, имеющие общую (соединяющую их) часть, называют *сообщающимися*. Обратим внимание, что



а *б*

Рис. 117

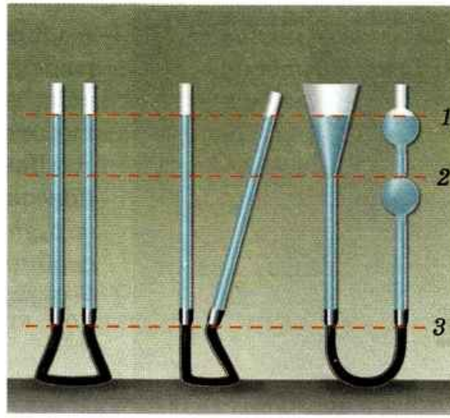


Рис. 118

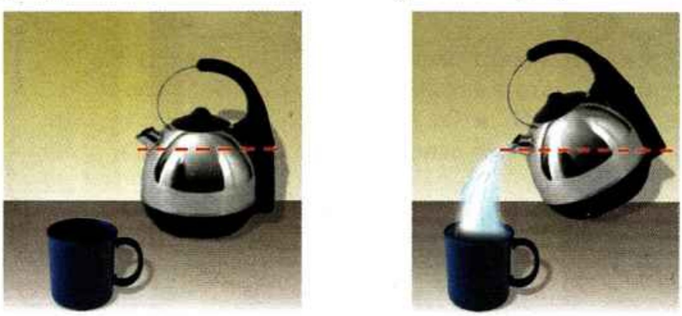
в наших сообщающихся сосудах поверхности заполняющей их жидкости расположены на одном уровне.

Если смещать трубки относительно друг друга (вверх, вниз), как показано на рисунке 117, *б*, то положение уровней воды не изменится. Это легко объяснить, пользуясь формулой $p = \rho g h$.

В покоящейся однородной жидкости давление на любом уровне (*1*, *2*, *3*, рис. 118) в сообщающихся сосудах одинаково (но для каждого уровня разное). Поэтому одинаковы и высоты столбов однородной жидкости над этими уровнями.

Однородная жидкость в сообщающихся сосудах любой формы устанавливается на одном уровне.

Чайник и его носик представляют собой сообщающиеся сосуды: вода в них стоит на одном уровне (рис 119, *а*). Когда мы наклоняем чайник, уровень воды остается прежним, а носик опускается. Когда он опустится до уровня воды, вода начинает выливаться (рис. 119, *б*).



а *б*

Рис. 119

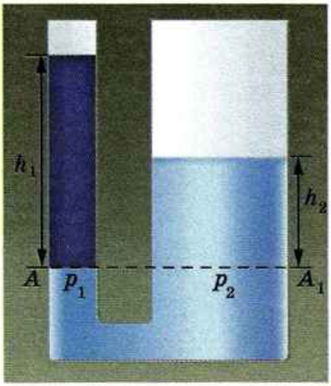


Рис. 120

* Если в сообщающихся сосудах находятся разнородные жидкости, то при равновесии уровни этих жидкостей не будут расположены на одной высоте (рис. 120).

Давление жидкости на уровне AA_1 при равновесии одинаково: $p_1 = p_2$. Но $p_1 = \rho_1 g h_1$, а $p_2 = \rho_2 g h_2$, где ρ_1 и ρ_2 — плотности жидкостей в сообщающихся сосудах. Следовательно, $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$, $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$,

или

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

*В сообщающихся сосудах высоты столбов жидкости над уровнем раздела жидкостей обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей.**

Жидкостный манометр. На свойстве сообщающихся сосудов основано устройство жидкостных манометров — приборов для измерения разности давлений.

Манометр состоит из двухколенной стеклянной трубки, в которую наливают подкрашенную жидкость. Жидкость устанавливается в обоих коленах на одном уровне. Чтобы понять, как работает манометр, соединим его резиновой трубкой с полой коробочкой, верх которой затянут тонкой резиновой пленкой. Если слегка надавить пальцем на пленку, то уровень жидкости в колене, соединенном с коробочкой, понизится, а в другом колене повысится (рис. 121). По образовавшейся разности в уровнях жидкости можно судить о давлении на пленку.

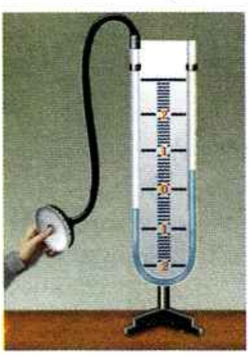
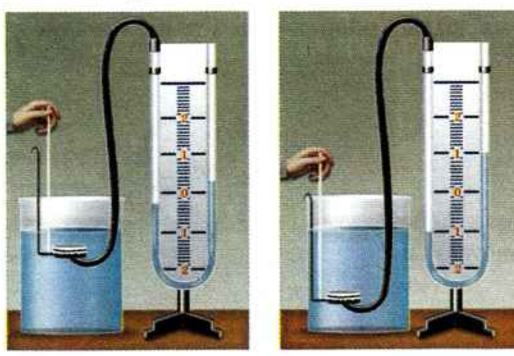


Рис. 121



а б

Рис. 122

С помощью такого манометра можно показать, что давление в жидкости зависит от глубины. Будем медленно погружать коробочку в высокий стеклянный сосуд, заполненный водой. При этом мы обнаружим, что разность высот столбов жидкости в коленах манометра увеличивается (рис. 122), т. е. гидростатическое давление жидкости возрастает.

Проверьте себя

1. Чем отличаются жидкости и газы от твердых тел?
2. Что такое давление? Какая единица принята за единицу давления в Международной системе единиц?
3. Какое давление называют гидростатическим?
4. Какие законы и формулы использовались для вывода формулы $p = \rho g h$?
5. Какие сосуды называют сообщающимися? Приведите примеры сообщающихся сосудов.
6. Каким свойством обладают сообщающиеся сосуды, заполненные однородной жидкостью?

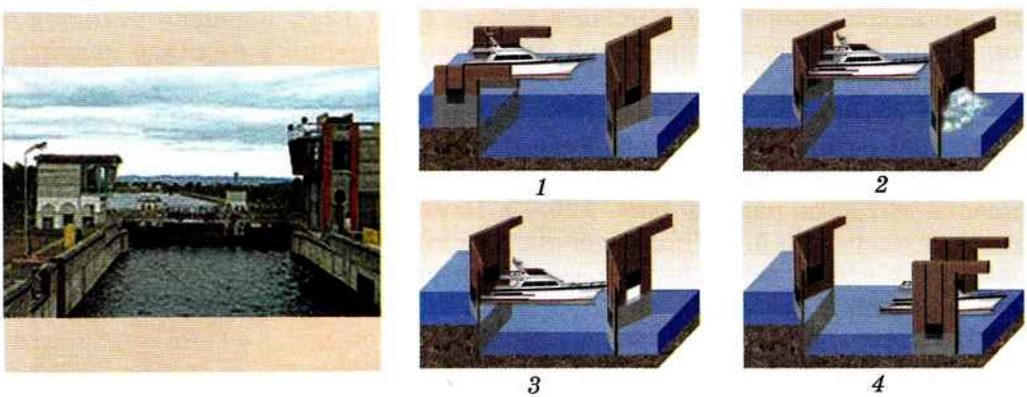


Рис. 123

7. На рисунке 123 показаны шлюз и схема шлюзования судна. Рассмотрите рисунок и объясните принцип действия шлюзов.
8. Водолаз работает под водой на глубине 50 м. Найдите давление воды на шлем водолоза и на его бахилы (подводные сапоги). Рост водолаза 180 см.

§ 35. Атмосферное давление

Планета Земля, на которой мы живем, окружена воздушной оболочкой, называемой *атмосферой*. Ее толщина около 1000 км. Молекулы газов, образующих атмосферу (азот, кислород, аргон, углекислый газ и др.), подобно обычным телам, притягиваются к Земле. В то же время из-за постоянных столкновений друг с другом они находятся в непрерывном беспорядочном движении. Если бы средняя скорость движения молекул, как показывают расчеты, была не меньше 11,2 км/с, то многие из них могли бы преодолеть силу притяжения Земли и покинуть ее. Но скорость большинства молекул значительно меньше, поэтому они остаются «привязанными» к Земле силой тяготения.

С другой стороны, несмотря на притяжение к Земле, атмосфера не падает на нее. Почему? Оказывается, все дело в столкновениях молекул. Если бы не столкновения, хаотичное движение молекул прекратилось бы, и они упали бы на земную поверхность.

Из-за притяжения к Земле верхние слои воздуха давят на нижние. Наибольшее давление, обусловленное весом воздуха, испытывает поверхность Земли, а также все тела, находящиеся на ней. Это давление получило название *атмосферного давления*.

Опыты, подтверждающие существование атмосферного давления. Если из цилиндра с поршнем выкачать воздух (рис. 124), поршень втянется в цилиндр. Естественной причиной втягивания поршня в цилиндр является давление воздуха.

Этот опыт можно видоизменить. Возьмем стеклянную банку и затянем ее тонкой резиновой пленкой. Если откачивать воздух из банки, то пленка прогнется внутрь (рис. 125, *а*), если же в банку нагнетать воздух, то пленка выгнется наружу (рис. 125, *б*). Наконец, если банку накрыть стеклянной пластинкой, то при откачивании воздуха пластинка сначала прижмется к ней, а затем будет раздавлена разностью давлений снаружи и изнутри банки (рис. 125, *в*).

По мере вытекания воды из пластмассового пакета пакет сжимается. Причиной сжатия пакета также является атмосферное давление.

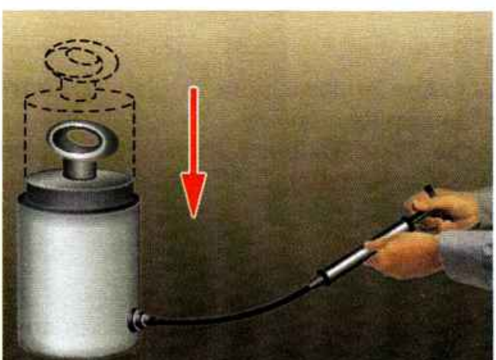


Рис. 124

Если бутылку с узким горлом, наполненную водой, опустить открытым горлом вниз, вода не вытекает, потому что вытеканию воды препятствует атмосферное давление.

В 1654 году немецкий физик Отто фон Герике в г. Магдебурге, чтобы доказать существование атмосферного давления, проделал интересный опыт. Он выкачал воздух из двух сложенных вместе медных полушарий, и давление наружного

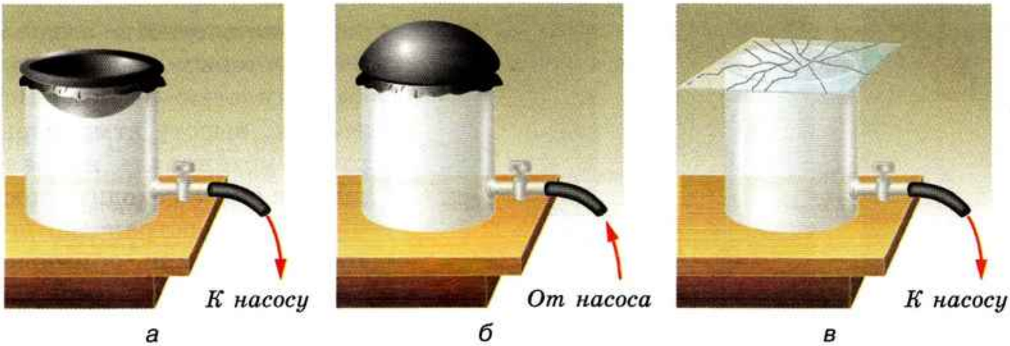


Рис. 125

воздуха прижало полушария друг к другу настолько сильно, что их не смогли разорвать несколько пар лошадей (рис. 126).

Измерение атмосферного давления. Формула для расчета давления жидкости

$$p = \rho g h$$

неприменима для расчета атмосферного давления, так как, во-первых, плотность воздуха различна на различной высоте. (В табл. 5 приведены

Таблица 5

Высота, км	0	10	20	40	60	80
Плотность, кг/м^3	1,2	0,4	0,09	0,004	0,0003	0,00001

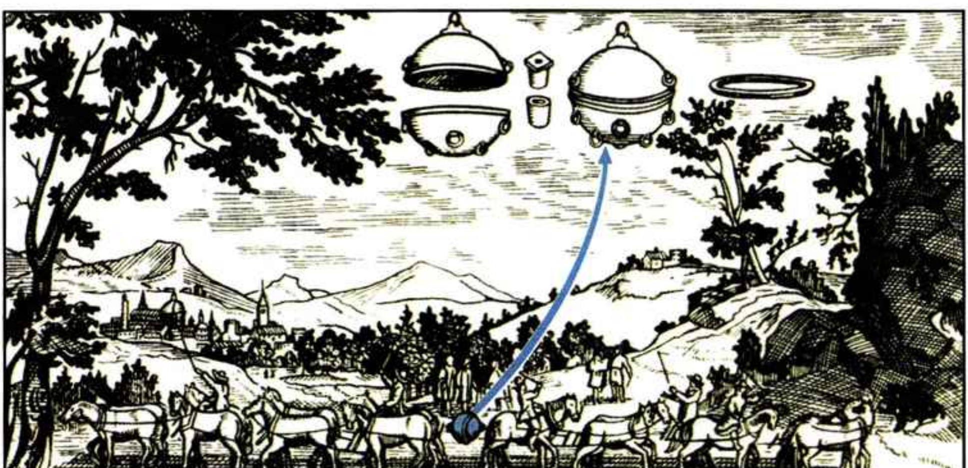


Рис. 126

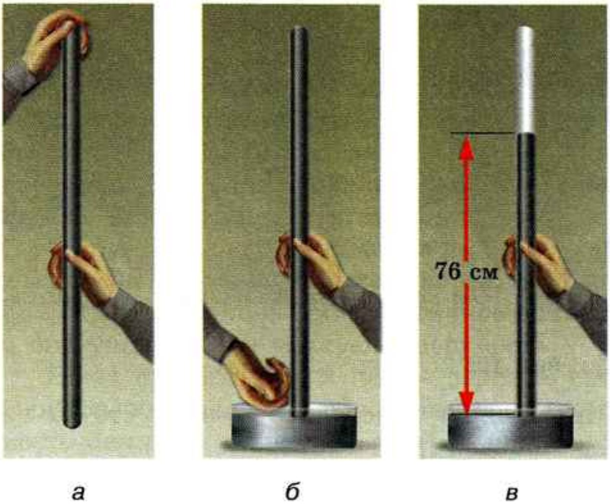


Рис. 127

значения плотности воздуха на различных высотах над поверхностью Земли.) Во-вторых, высоту атмосферы точно установить нельзя, так как она переходит в космическое пространство постепенно и лишь примерно считается равной 1000 км. Поэтому атмосферное давление измеряют экспериментально.

Однако, если речь идет о небольших перепадах высот, например, между полом и потолком комнаты, формулой пользоваться можно.

На вопрос «Как измерить атмосферное давление?» нашел ответ итальянский физик и математик Э. Торричелли. По его предложению в 1643 году был произведен следующий опыт. Стеклянную трубку длиной около 1 м, запаянную с одного конца, наполнили ртутью (рис. 127, *а*). Закрыв конец трубки пальцем, перевернули ее и опустили в чашку с ртутью, после чего палец убрали (рис. 127, *б*). Часть ртути при этом из трубки вылилась в чашку. Высота столбика ртути, оставшейся в трубке, примерно равна 76 см (рис. 127, *в*). Над ртутью в трубке воздуха нет. Это безвоздушное пространство называют «торричеллиевой пустотой».

Торричелли дал объяснение этому опыту. Атмосфера давит на поверхность ртути в чашке, и толща воздуха — это как бы одно колено сообщающихся сосудов. А другое колено — это столб ртути в трубке. Эти два столба взаимно уравновешены, следовательно, атмосферное давление равно

Торричелли Эванджелиста (1608—1647) — итальянский физик и математик. Впервые доказал существование атмосферного давления и вакуума (торричеллиева пустота). Изобрел ртутный барометр и объяснил факт изменения атмосферного давления в зависимости от состояния погоды. Во время опытов с ртутным барометром опроверг бытовавшее до него мнение, что «природа боится пустоты».

давлению, создаваемому ртутным столбом: $p_а = p_{рт}$. Измерив высоту ртутного столба, можно определить атмосферное давление по формуле:

$$p = \rho g h,$$

где ρ — плотность ртути.

Так как давление пропорционально высоте ртутного столба, то давление можно измерять этой высотой, т. е. выражать в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст).

Если к трубке, использовавшейся в опыте Торричелли, прикрепить вертикальную шкалу, то получится простейший прибор для измерения атмосферного давления — ртутный барометр (от греческих слов: *барос* — «тяжесть», *метрео* — «измеряю»).

*Измеряя атмосферное давление барометром, можно обнаружить, что оно уменьшается с увеличением высоты над поверхностью Земли.

В настоящее время атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °С, принято называть *нормальным атмосферным давлением*.

Выразим это давление в знакомых вам единицах — паскалях. Воспользуемся формулой $p = \rho g h$ и учтем, что плотность ртути при 0 °С ρ = 13 595,1 кг/м^3, ускорение свободного падения g = 9,80665 м/с^2. Тогда для нормального атмосферного давления получим значение $p_а$ = 101 325 Па.

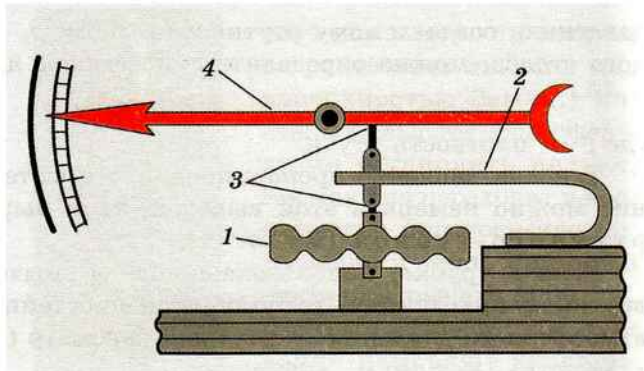
Атмосферное давление, близкое к нормальному, наблюдается обычно в ясную погоду в местностях, находящихся на уровне моря. На возвышенностях при тех же условиях нормальное атмосферное давление, разумеется, меньше. Например, в Москве, расположенной на высоте 100—120 м над уровнем моря, нормальным считается давление около 745 мм рт. ст. (≈99 330 Па).

Мы не ощущаем на себе влияние атмосферного давления потому, что кровь и другие жидкости и газы в наших телах сжаты до такого же давления. В результате все наши органы испытывают одно и то же давление как снаружи, так и изнутри, и не деформируются.*

Приборы для измерения давления. Эталоном измерителя давления является ртутный барометр, состоящий из стеклянной трубки с ртутью, чаши со ртутью и измерительной миллиметровой шкалы (рис. 128). Это те же части прибора, которые использовал Торричелли.

Рис. 128

а



б

Рис. 129

Ртутные барометры применяются в основном в специальных лабораториях, но для повседневного измерения давления на производстве, транспорте и в быту из-за их громоздкости (высота их примерно 1 м) и из-за неизбежного испарения ртути, пары которой весьма ядовиты, они неудобны. Поэтому был создан металлический барометр, называемый *анероидом* (в переводе с греческого — безжидкостный. Так барометр называют потому, что он не содержит ртути).

Барометр-анероид (рис. 129, *а*) состоит из прочной металлической коробочки *1*, герметически закрытой металлической гофрированной крышкой (рис. 129, *б*). Воздух из коробочки выкачан. Чтобы атмосферное давление не раздавило коробочку, ее оттягивает плоская пружина *2*. При изменении атмосферного давления гибкая гофрированная крышка коробочки изменяет свое положение, при этом пружина деформируется. К пружине с помощью передаточного механизма *3* прикреплена стрелка-указатель *4*. В зависимости от характера изменения давления стрелка поворачивается по часовой стрелке или против.

Барометр-анероид имеет две шкалы: внутренняя шкала проградуирована в миллиметрах ртутного столба, наружная — в гектопаскалях.

Обычный бытовой барометр довольно чувствителен: он отмечает изменение атмосферного давления на 1—2 мм рт. ст.

*Оценим, можно ли с помощью барометра-анероида измерить перепад давления в воздухе у пола и у потолка в комнате высотой 3 м. Считая плотность и температуру воздуха одинаковой по высоте, по формуле $p = \rho_{в} g h$ ($\rho_{в}$ — плотность воздуха) найдем:

$$p = 1{,}3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 \cdot 3 \text{ м} = 11 \text{ Па} = 0{,}91 \text{ мм рт. ст.}$$

Столь малое изменение давления барометр-анероид может не показать. Но если, держа барометр в руках, спуститься с ним с четвертого этажа на первый, перепад высот увеличится в три раза, и соответствующее изменение давления (3,6 мм рт. ст.) барометр легко обнаружит. Убедитесь в этом сами.

Устройства, использующие атмосферное давление. Существует большое число устройств, в которых используется атмосферное давление. К их числу относятся насосы.

Всасывающие насосы для подъема воды были известны уже в III в. до н. э. Устройство простейшего всасывающего насоса показано на рисунке 130. Основной частью насоса является цилиндр *1*, в котором движется плотно прилегающий к стенкам цилиндра поршень *2*. Цилиндр соединен с трубкой *3*, через которую происходит всасывание воды. Отверстие, соединяющее цилиндр с всасывающей трубой, закрывается клапаном *4*. В поршне имеется отверстие, которое закрывается клапаном *5*. Оба клапана могут открываться только вверх.

При движении поршня вверх (см. рис. 130, *а*) над клапаном *4* образуется разреженное пространство, поэтому наружное атмосферное давление заставляет воду подниматься по всасывающей трубе вверх. Клапан *4* под давлением воды поднимается, и вслед за поршнем вода поступает в цилиндр. Клапан *5* в это время закрыт.

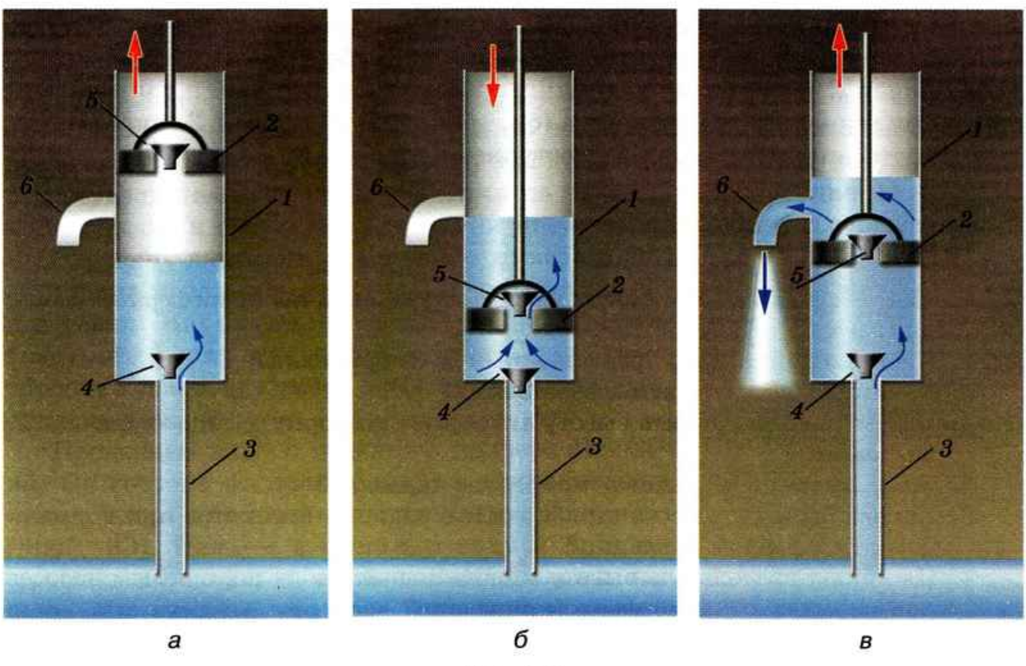
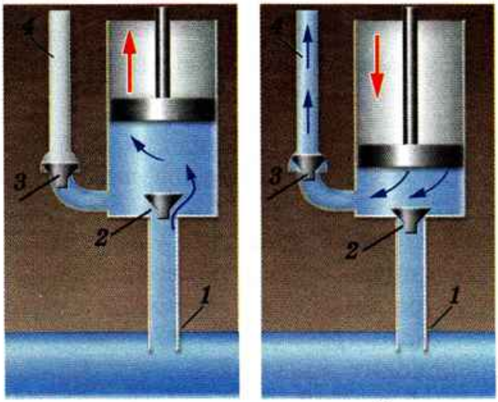


Рис. 130



а *б*

Рис. 131

При движении поршня вниз (см. рис. 130, *б*) клапан *4* закрывается. Одновременно под давлением воды открывается клапан *5* и через образовавшееся отверстие вода проходит в верхнюю часть цилиндра.

При последующем движении поршня вверх происходят два процесса: первый состоит в том, что в цилиндр засасывается новая порция воды, а второй — в том, что вода, находящаяся над клапаном *5*, выливается через трубу *6* в резервуар для приема воды (см. рис. 130, *в*).

Нагнетательные насосы предназначены для накачивания жидкости или газа в какой-либо сосуд. Например, нагнетательный воздушный насос используется для накачивания футбольных мячей и велосипедных камер, а также в тех случаях, когда надо создать большое давление (пример — пожарные насосы, выбрасывающие струю воды на большие расстояния).

Устройство нагнетательного насоса показано на рисунке 131. При движении поршня вверх (см. рис. 131, *а*) под ним давление падает, под действием атмосферного давления жидкость по трубе *1* поднимается, открывает клапан *2* и проходит в цилиндр. Клапан *3* в это время закрыт. При обратном движении поршня вниз (см. рис. 131, *б*) клапан *2* закрывается, а жидкость, подняв клапан *3*, поступает в трубу *4*.*

Проверьте себя

1. Какие известные вам факты указывают на наличие атмосферного давления?
2. В чем состоял опыт, предложенный Э. Торричелли?
3. Почему существует атмосфера Земли?
4. Почему нельзя оценить высоту атмосферы по формуле гидростатического давления?
5. Чему равно нормальное атмосферное давление?
6. Какова была бы высота столба воды в водяном барометре при нормальном атмосферном давлении?
7. На какую предельную высоту можно поднять воду поршневым насосом при нормальном атмосферном давлении?

*8. Атмосфера состоит из молекул, каждая из которых притягивается к Земле. Почему атмосфера не падает?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

«Магдебургские полушария» имеются у каждого человека: головки бедренных костей удерживаются в тазовом суставе атмосферным давлением.

§ 36. Закон Паскаля и его применение

Передача давления жидкостями и газами. Вы узнали, что сила притяжения Земли приводит к деформации внутренних слоев жидкости вышележащими слоями и к возникновению сил упругости, называемых силами давления. Однако, кроме силы тяжести, действующей на все частицы жидкости, могут быть силы, действующие только на ее поверхность. Выясним, как жидкости и газы, заключенные в сосуды, передают производимое на них давление.

Представим себе некоторый объем жидкости, находящейся в цилиндре под поршнем. В стенке цилиндра проделано отверстие, затянутое резиновой пленкой. Если, прилагая силу, заставить поршень немного войти в сосуд и сжать жидкость, то мы увидим, что пленка выгнулась наружу (рис. 132). Это говорит о том, что силы давления, действующие со стороны жидкости на данный участок, перпендикулярны ему. Эти силы возникли вследствие сжатия жидкости внешней силой. Они распределены по всей поверхности соприкосновения жидкости и твердого тела. Этот вывод подтверждается таким эффектным опытом. Если в наполненный водой сосуд выстрелить обычной оружейной пулей, то сосуд разбивается на мелкие осколки, которые разлетаются по всевозможным направлениям. Это происходит потому, что в момент проникновения пули в сосуд с водой резко увеличиваются силы давления на стенки, действующие по всем направлениям, и сосуд, который пуля не успевает пробить, разрывается.

Передачу давления равномерно во все стороны можно наблюдать не только в жидкостях, но и в газах. Например, когда надувают детский воздушный шар или волейбольный мяч, то и оболочка шара, и камера мяча принимают сферическую форму.

Рис. 132

Проделаем опыт с помощью прибора Паскаля. Он состоит из полого шара с одинаковыми отверстиями и стеклянного цилиндра с поршнем (рис. 133). Нальем в цилиндр воду и начнем вдвигать поршень, т. е. оказывать давление на воду. Мы увидим, что вода выливается одинаковыми струйками не только через те отверстия, которые находятся напротив поршня, но и через

а

б

Рис. 133

остальные тоже (рис. 133, *а*). Передача давления без изменения во все стороны присуща и газам. Заполним шар Паскаля дымом и будем вдвигать поршень. Мы обнаружим, что и в этом опыте струйки дыма вытекают через отверстия во все стороны и имеют одинаковую длину (рис. 133, *б*). Это свидетельствует о том, что давление не только передается во все точки, но и имеет одинаковое значение.

Внешнее давление, производимое на неподвижную жидкость или газ, передается в каждую точку жидкости или газа без изменения.

Это утверждение называют *законом Паскаля*.

Гидравлические механизмы. Закон Паскаля лежит в основе действия ряда механизмов и машин, называемых *гидравлическими*. Простейший гидравлический механизм состоит из двух цилиндров разного диаметра, снабженных поршнями. Цилиндры соединены между собой и заполнены жидкостью, обычно — маслом. Жидкость в обоих цилиндрах располагается на одном уровне, если на поршни не действуют силы.

Паскаль Блез (1623—1662) — французский физик, математик, философ. Открыл основной закон гидростатики, который носит его имя.
Убедительными опытами подтвердил существование атмосферного давления. Установил зависимость атмосферного давления от высоты, исследовал зависимость показаний барометра от влажности воздуха.
В честь Паскаля названа единица давления в Международной системе единиц.

Приложим к малому поршню силу $\vec{F_1}$ (рис. 134). Рассчитаем, какую силу $\vec{F_2}$ нужно приложить к большому поршню, чтобы сохранить равновесие.

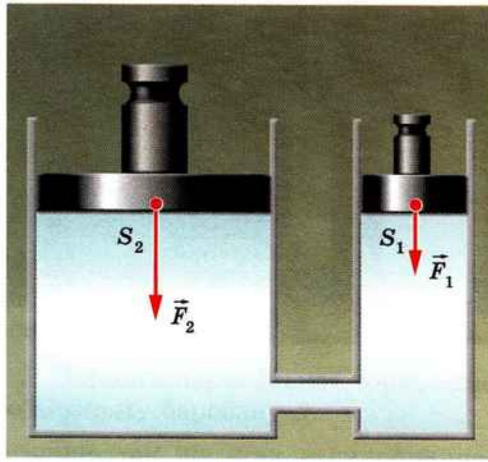


Рис. 134

Сила $\vec{F_1}$ создает давление, которое в случае равновесия в соответствии с законом Паскаля, должно быть одинаковым во всех точках жидкости, т. е. давления под малым и большим поршнями должны быть равными:

$$p_1 = p_2.$$

Каждое из этих давлений можно выразить через силу, действующую на поршень, и его площадь:

$$p_1 = \frac{F_1}{S_1},\ p_2 = \frac{F_2}{S_2},$$

где S_1 — площадь малого поршня, S_2 — площадь большого поршня.

Следовательно,

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}.$$

Отсюда

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1},$$

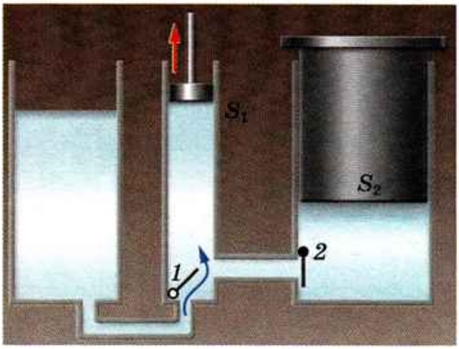
или

$$\boxed{\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.}$$

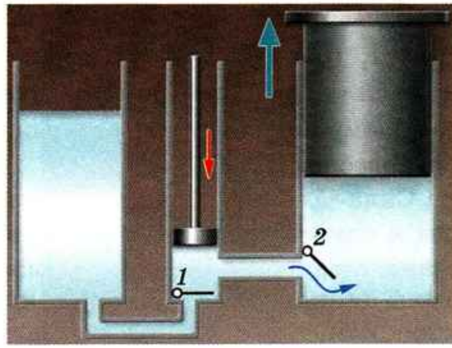
Отношение $\frac{F_2}{F_1}$ характеризует *выигрыш в силе*, получаемый в данном механизме. Из полученной формулы следует, что выигрыш в силе определяется отношением площадей $\frac{S_2}{S_1}$.

Чем больше отношение площадей поршней, тем больше выигрыш в силе.

Практическим применением этого правила являются гидравлический пресс, подъемник и множество других устройств.



а



б

Рис. 135

*Рассмотрим работу **гидравлического подъемника.** На рисунке 135, *а*, *б* показана его упрощенная схема.

Нагнетательный насос (площадь сечения поршня S_1) соединен маслопроводом с цилиндром, в котором ходит поршень площадью сечения S_2, и с баком, в котором хранится масло, необходимое для работы подъемника.

При движении поршня насоса вверх (см. рис. 135, *а*) клапан *1*, расположенный у маслопровода, откроется, а клапан *2* в цилиндре подъемника закроется. В результате цилиндр насоса заполнится маслом.

При движении поршня вниз (см. рис. 135, *б*) клапан *1* закроется, а клапан *2* откроется, и масло под давлением *p*, созданным внешней силой $\vec{F_1}$, поступит в цилиндр подъемника, где в соответствии с законом Паскаля давление также будет *p*. Поэтому на большой поршень начинает со стороны масла действовать сила $\vec{F_2}$, модуль которой равен $F_2 = pS_2$. Так как $p = \frac{F_1}{S_1}$, то $F_2 = \frac{F_1}{S_1}S_2$. Сила $\vec{F_2}$ направлена вертикально вверх.

Допустим, что $S_2 = 100\ S_1$, тогда $F_2 = 100\ F_1$.

Гидравлические подъемники применяют для поднятия автомобилей, вагонов и т. д.

Гидравлический тормоз. Для того чтобы при торможении автомобиль не занесло в ту или иную сторону, торможение правых и левых колес должно быть одновременным и совершенно одинаковым. Для этого в автомобилях используется гидравлический тормоз. На рисунке 136 показана схема устройства такого гидравлического тормоза.

В обычном состоянии тормозные колодки *1* в колесе стянуты пружиной *2*, которая уравновешивает небольшое давление масла в цилиндре *3*. При торможении водитель нажимает на педаль тормоза *4*. Соединенный с тягой *5* поршень *6* давит на масло, которое передает давление на поршни,

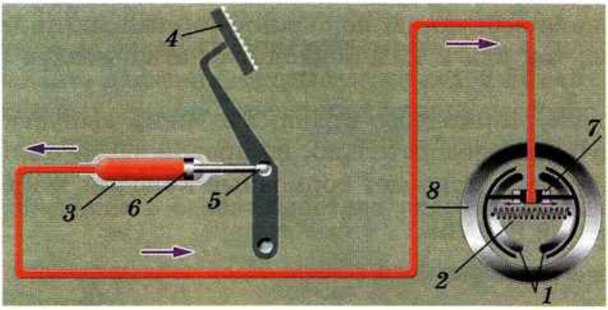


Рис. 136

расположенные в тормозном цилиндре *7*. Поршни перемещают тормозные колодки *1*, которые прижимаются к тормозному барабану *8*.

Гидравлический пресс устроен примерно так же, как и гидравлический подъемник, но имеет опорную раму. Прессуемое тело сжимается между рамой и поршнем. Изучите устройство гидравлического пресса по рисунку 137. Цифрами на рисунке обозначены: *1* — малый поршень; *2* — поршень большого сечения; *3* — прессуемое тело; *4* — манометр, служащий для измерения давления внутри жидкости пресса; *5* и *6* — клапаны.

Гидравлические прессы широко применяются на современных производствах, например, для ковки слитков, прессовки металлических и пластмассовых деталей, выдавливания труб и профилей, прессовки сена или хлопка, выдавливания масла из семян масличных растений. С помощью гидравлических прессов получают фанеру, картон и искусственные алмазы.

Пневматический тормоз. В пассажирских железнодорожных вагонах устанавливают так называемые краны экстренного торможения. На рисунке 138 показано устройство, связанное с этим краном. В нормальном

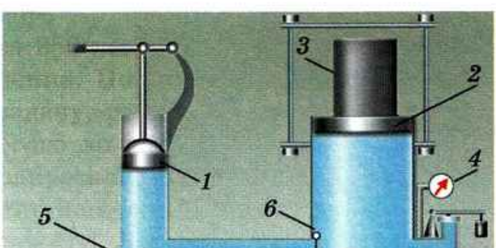


Рис. 137

Рис. 138

состоянии давление воздуха на поршень в тормозных цилиндрах справа и слева одинаково, так как к ним подходит сжатый воздух из одного и того же резервуара.

Дернув за ручку тормозного крана, пассажир выпустит воздух из магистральной трубы и, следовательно, из правой части цилиндра. Поршень переместится вправо и прижмет тормозные колодки к колесам.*

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На какой глубине давление, оказываемое водой на аквалангиста, в два раза превышает атмосферное?

Решение. Под водой давление на аквалангиста складывается из атмосферного давления, которое передается водой без изменения, и гидростатического давления воды:

$$p = p_а + p_г.$$

По условию $p = 2p_а$, поэтому $p_г = p_а$, так что искомую глубину h найдем из равенства $\rho g h = p_а$:

$$h = \frac{p_а}{\rho g}; \ h = \frac{101 \cdot 10^3 \text{ Па}}{1000 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9{,}8 \ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \approx 10{,}3 \text{ м}.$$

Таким образом, столб воды толщиной около 10 м оказывает такое же давление, что и вся атмосфера.

Ответ: 10,3 м.

Проверьте себя

1. Как жидкости и газы передают давление? Приведите примеры.
2. Сформулируйте закон Паскаля.
3. Применим ли закон Паскаля к твердым телам?

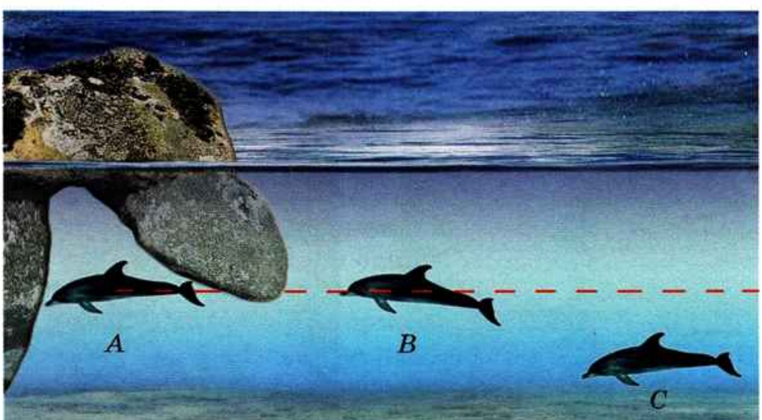


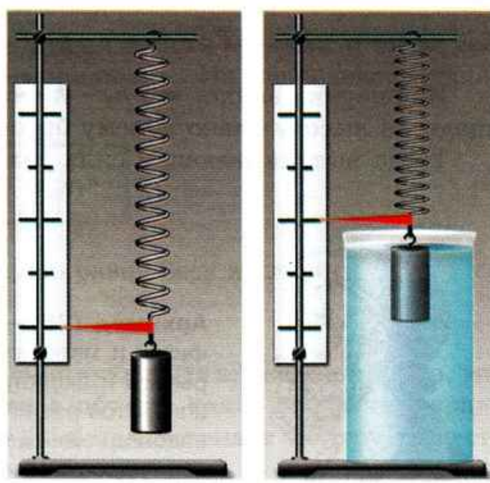
Рис. 139

4. На рисунке 139 показаны три дельфина. Дельфин A находится в подводной пещере на одной глубине с дельфином B, а дельфин C — ближе ко дну. Сравните давления, оказываемые водой на этих дельфинов.
5. В два одинаковых внешне деревянных ящика выстрелили. Сквозь один пуля прошла, пробив две дырки. Другой же разлетелся вдребезги. Объясните почему.
6. Какой закон лежит в основе действия гидравлических механизмов и машин?
7. Во сколько раз дает выигрыш в силе гидравлическая машина (при отсутствии трения)?
8. Гидравлический подъемник имеет тридцатикратный выигрыш в силе. На один поршень действует сила 2 кН. Определите массу автомобиля, который может поднять данный механизм.

§ 37. Закон Архимеда и его применение

Выталкивающая сила. Подвесим тело к пружине с указателем и зафиксируем его положение (рис. 140, *а*). Тело находится в равновесии. Сила упругости растянутой пружины по модулю равна весу тела. Начнем погружать тело в воду. Мы увидим, что по мере погружения тела пружина сокращается. Тело снова оказывается в равновесии при меньшем растяжении пружины (рис. 140, *б*).

Результаты опыта показывают, что на тело, погруженное в жидкость, кроме силы упругости и силы тяжести, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и уменьшающая вес тела. Выталкивающую силу называют архимедовой силой в честь древнегреческого ученого Архимеда, который примерно за 250 лет до н. э. рассчитал ее значение. По преданию, он решил эту задачу, пытаясь определить: из чистого ли золота сделана корона сиракузского царя Гиерона или ювелир изготовил ее из сплава золота и серебра. Легенда гласит, что мысль, давшая решение этой задаче, пришла Архимеду в голову в тот момент, когда он погрузился в ванну. Архимед, якобы возбужденный пришедшей ему идеей, выскочил из



а *б*

Рис. 140

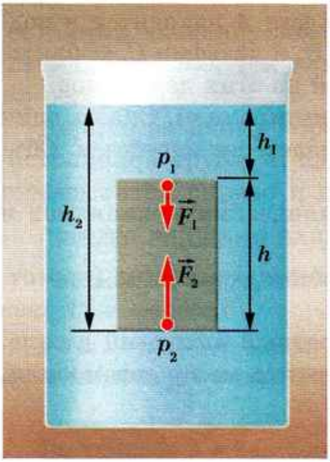


Рис. 141

ванны и побежал по улице с криком «Эврика! Эврика!», что значит «Нашел! Нашел!».

Закон Архимеда. Рассчитаем значение выталкивающей силы. Для простоты рассмотрим тело в форме прямоугольного бруска. Это тело погружено в жидкость так, что его основания расположены горизонтально (рис. 141). Силы, действующие на боковые грани бруска, взаимно уравновешиваются. Силы же, действующие на верхнюю и нижнюю грани (основания) бруска, не одинаковы.

На верхнее основание (верхнюю грань) давит сверху столб жидкости высотой h_1 с силой $\vec{F_1}$ (см. рис. 141), модуль которой равен:

$$F_1 = p_1 S = \rho_ж \, g h_1 S,$$

где $\rho_ж$ — плотность жидкости, S — площадь основания (грани).

Модуль силы давления $\vec{F_2}$, действующей на нижнее основание (нижнюю грань) бруска, равен:

$$F_2 = p_2 S_2 = \rho_ж \, g h_2 S,$$

где h_2 — глубина, на которой находится нижнее основание. Так как $h_2 > h_1$, то $F_2 > F_1$. Поэтому модуль равнодействующей силы равен:

$$F_{выт} = F_2 - F_1 = \rho_ж \, g h_2 S - \rho_ж \, g h_1 S = \rho_ж \, g(h_2 - h_1)S.$$

Из рисунка видно, что $h_2 - h_1$ есть высота бруска h. Произведение площади на высоту равно объему бруска: $Sh = V$.

Тогда выталкивающая сила равна:

$$F_{выт} = \rho_ж g V. \qquad (1)$$

Архимед (287—212 до н. э.) — древнегреческий ученый, физик и математик, механик и астроном. Разработал теорию рычага и сконструировал множество машин и механических аппаратов различного назначения (машина для полива полей, водоподъемный винт, военные машины). Архимед открыл закон гидростатики, носящий его имя. Проводил опыты по преломлению света, исследовал свойства плоских, выпуклых и вогнутых зеркал.

В правую часть этого выражения входит произведение плотности жидкости на объем тела ($\rho_ж V$), а это есть масса жидкости $m_ж$ в объеме тела.

Следовательно,

$$F_{выт} = m_ж g. \quad (2)$$

* Покажем, что этот вывод справедлив для тела произвольной формы. Мысленно удалим погруженное в жидкость тело и заполним объем, который оно занимало, жидкостью (рис. 142). При этом вся жидкость в сосуде останется в равновесии, и можно считать ту часть жидкости, которая заняла место удаленного тела, отвердевшей. На эту «отвердевшую» жидкость действует сила тяжести $\vec{F}_т$, приложенная к ее центру тяжести O. Кроме того, на нее действует сила, представляющая собой равнодействующую $\vec{F}_р$ сил давления, действующих со стороны окружающей жидкости.

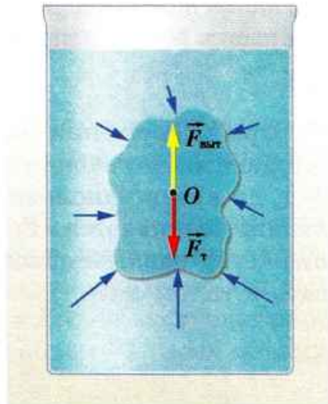


Рис. 142

Так как выделенный объем находится в равновесии, то сила $\vec{F}_р$ должна быть направлена вверх, равна по модулю силе тяжести, действующей на выделенный «отвердевший» объем, а линия ее действия должна проходить через его центр тяжести: $F_р = F_т = m_ж g$.

Теперь заменим «отвердевший» объем жидкости снова твердым телом. Силы давления, действующие на тело, будут такими же, как и силы давления, действующие на «отвердевшую» жидкость. Их равнодействующая и есть выталкивающая сила:

$$\boxed{F_р = F_{выт} = m_ж g.^*} \quad (3)$$

Так как сила тяжести $m_ж \vec{g}$ по модулю равна весу жидкости $\vec{P}_ж$, то мы приходим к следующему выводу:

На погруженное в жидкость тело действует выталкивающая сила, модуль которой равен весу жидкости в объеме тела. Выталкивающая сила направлена вертикально вверх и приложена к центру тяжести вытесненного объема жидкости.

Это и есть *закон Архимеда*.

Выталкивающая сила действует всегда, даже если тело частично погружено в жидкость. В этом случае под объемом в формуле (1) следует понимать объем погруженной части тела $V_п$ и формула (1) принимает вид:

$$F_{выт} = \rho_ж g V_п. \quad (4)$$

При погружении тела в жидкость происходит вытеснение этим телом жидкости. Это можно заметить, если погрузить какой-либо предмет в сосуд, до краев наполненный жидкостью. При этом жидкость из сосуда частично выливается. Если измерить объем вытесненной жидкости, то он окажется равным объему тела: $V_ж = V$. Поэтому формулу (1) можно записать в таком виде:

$$\boxed{F_{выт} = \rho_ж V_ж g.} \quad (5)$$

Правая часть этого равенства представляет собой вес вытесненной жидкости. Следовательно, возможна и такая формулировка закона Архимеда:

На всякое тело, погруженное в жидкость, со стороны этой жидкости действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости, направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема жидкости.

Плавание тел. Так как на любое находящееся в жидкости тело действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_т$, направленная вертикально вниз, и выталкивающая (архимедова) сила $\vec{F}_{выт}$, направленная вертикально вверх, то поведение тела в жидкости будет зависеть от соотношения этих сил. При этом возможны три случая.

1. Сила тяжести и архимедова сила равны по модулю:

$$F_т = F_{выт}. \quad (6)$$

В этом случае тело находится в равновесии.

Равенство (6) выражает условие плавания тел: *для того чтобы тело плавало, необходимо, чтобы действующая на него сила тяжести уравновешивалась выталкивающей силой.*

Придадим выражению (6) другой вид. Так как $F_т = m_т g = \rho V g$, а $F_{выт} = \rho_ж V_ж g$, где ρ и $\rho_ж$ — соответственно, плотность вещества тела и плотность жидкости, V и $V_ж$ — объем тела и объем вытесняемой телом жидкости, то получается равенство:

$$\rho V g = \rho_ж V_ж g,$$

или

$$\rho V = \rho_ж V_ж. \quad (7)$$

Когда тело полностью погружено в жидкость, объем вытесняемой телом жидкости равен объему тела: $V_ж = V$. Разделив обе части равенства (7) на одинаковое значение объема, получим условие плавания в новой форме:

$$\rho = \rho_ж. \tag{8}$$

Для того чтобы тело плавало, будучи полностью погруженным в жидкость, необходимо, чтобы плотность тела была равна плотности жидкости.

2. Выталкивающая сила больше силы тяжести: $F_{выт} > F_т$. В этом случае тело всплывает на поверхность жидкости, но поднявшись, оно начинает выступать из жидкости, и выталкивающая сила уменьшается. Всплывание прекратится, когда наступит равновесие ($F_{выт} = F_т$), но наступает оно, когда тело погружено в жидкость лишь частично, и объем $V_ж$ равен объему той части тела, которая находится в жидкости.

Таким образом, если тело плавает на поверхности жидкости, то сила тяжести и архимедова сила снова равны по модулю, и равенство (7) остается в силе. Но поскольку $V_ж < V$, плотность жидкости должна быть больше плотности тела: $\rho_ж > \rho$.

Для того чтобы тело плавало, частично выступая над поверхностью жидкости, необходимо, чтобы плотность тела была меньше плотности жидкости.

*Найдем, какая часть плавающего тела выступает над жидкостью. Для этого формулу (7) запишем в виде пропорции

$$\frac{V_ж}{V} = \frac{\rho}{\rho_ж}$$

и вычтем единицу из ее левой и правой части. После простых алгебраических преобразований получим искомое соотношение:

$$\frac{V - V_ж}{V} = \frac{\rho_ж - \rho}{\rho_ж}, \tag{9}$$

где $V - V_ж$ — объем выступающей части тела.

Из формулы (9) следует, что у айсберга ($\rho = 900$ кг/м^3) над водой находится лишь одна десятая его объема, а остальные 90% (!) объема не видны. Так же погружаются в воду комки мокрого снега. У брусков пенопласта ($\rho = 125$ кг/м^3) все наоборот: под водой скрыто только 12% объема, поэтому из таких брусков, обшитых ярко-оранжевой материей, делают нагрудные спасательные пояса. А вот для изготовления спасательных кругов используется не пенопласт, а пробка, несмотря на то, что она погружается в воду глубже пенопласта (ее плотность 25 кг/м^3); но пробка прочнее пенопласта.

3. Если сила тяжести больше выталкивающей (архимедовой) силы: $F_т > F_{выт}$, то тело тонет. Это происходит в том случае, когда плотность тела больше плотности жидкости.

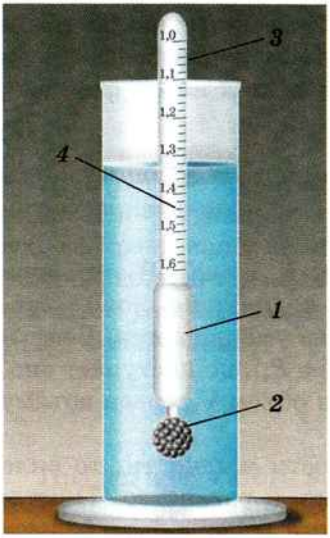


Рис. 143

Ареометр. Закон плавания тел положен в основу устройства ареометра — прибора для измерения плотности жидкостей. Он состоит из полого корпуса *1* (рис. 143), на дне которого находится балласт из дроби *2*, залитой мастикой. Вверху корпус переходит в трубчатый стержень *3*, внутри которого расположена шкала *4*. При опускании в жидкость ареометр погружается на бóльшую или меньшую глубину в зависимости от плотности жидкости. Чем больше плотность жидкости, тем меньше погружен ареометр.

Для градуировки шкалы эталонного ареометра его последовательно опускают в жидкости, плотности которых точно известны (плотность жидкостей можно определить по формуле $\rho_ж = \frac{m_ж}{V_ж}$), и каждый раз отмечают глубину погружения. По этим данным создают шкалу ареометра. Значения отметок на шкале растут сверху вниз.*

Плавание судов. Тело, плотность которого больше плотности жидкости, не всегда тонет в ней. Для этого оно должно иметь определенную форму. Рассмотрим опыт. Возьмем два одинаковых куска тонкой фольги. Один из них опустим в сосуд с водой — он утонет. Это понятно: плотность фольги больше плотности воды. Сделаем из другого куска лодочку. Опустив ее в воду, мы увидим, что лодочка плавает на поверхности воды. Очевидно, лодочка вытесняет больший объем жидкости, чем плоский кусок фольги, и выталкивающая сила оказывается равной силе тяжести, действующей на лодочку, что позволяет ей плавать. Именно этот фактор учитывается в судостроении.

При постройке кораблей используются разные материалы: сталь, дерево, цветные металлы и т. д. Плотность большинства из них больше плотности воды. Но так как корабли внутри себя имеют много помещений и отсеков, заполненных воздухом, то средняя плотность корабля оказывается меньше плотности воды, поэтому судно плавает.

Наибольшая глубина, на которую может погрузиться судно при полной загрузке (его осадка), отмечается на корпусе судна особой линией, получившей название *ватерлинии*. По высоте ватерлинии над поверхностью воды вы всегда можете определить, загружено судно или идет порожняком. Массу воды, вытесняемой полностью загруженным кораблем, называют *водоизмещением* судна. Водоизмещение судна совпадает с его собственной массой (вместе с грузом) и обычно выражается в тоннах. Например, водоизмещение танкеров-гигантов составляет более 640 тыс. т.

***Воздухоплавание.** Выталкивающая сила действует и на тела, находящиеся в воздухе или в других газах. Поскольку размеры этих тел обычно невелики, ее можно рассчитать по формуле (1), подставив вместо плотности жидкости плотность газа, а вместо объема вытесненной жидкости — объем вытесненного газа:

$$F_{\text{выт}} = \rho_{\text{г}} V g. \tag{9}$$

Именно благодаря действию выталкивающей силы поднимаются вверх детские шарики, шары-зонды, воздушные шары, дирижабли.

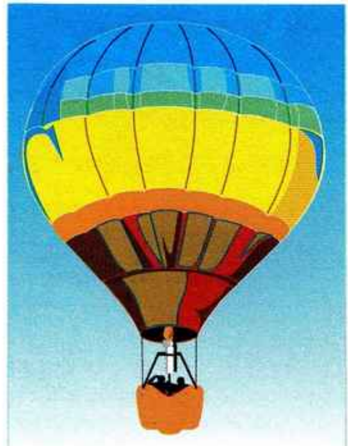


Рис. 144

Рассмотрим, как осуществляется полет шара (рис. 144). В начале полета оболочку шара наполняют газом, плотность которого меньше плотности воздуха у поверхности Земли, например гелием. На наполненный газом шар действует выталкивающая сила $\vec{F}_{\text{выт}}$, равная по модулю весу вытесняемого воздуха и направленная вертикально вверх. Вертикально вниз направлена сила тяжести $\vec{F}_{\text{т}}$, которая действует на оболочку и наполняющий ее газ. Рассмотрим возможные варианты поведения шара:

а) $F_{\text{т}} > F_{\text{выт}}$ — шар будет лежать на поверхности Земли;

б) $F_{\text{т}} < F_{\text{выт}}$ — шар начнет ускоренно подниматься вверх.

Так как плотность воздуха по мере поднятия шара уменьшается, то наступит момент, когда выталкивающая сила $\vec{F}_{\text{выт}}$ станет равной по модулю силе тяжести $\vec{F}_{\text{т}}$: $F_{\text{выт}} = F_{\text{т}}$. В этот момент подъем шара прекратится, шар «зависнет».

Для того, чтобы определить, какой *полезный груз* способен поднять воздушный шар, надо знать его *подъемную силу*.

В случае «парящего» шара подъемная сила $F_{\text{п}}$ (ее модуль) равна разности между модулем выталкивающей силы и модулем силы тяжести, действующей на шар (на оболочку шара и газ без груза):

$$F_{\text{п}} = F_{\text{выт}} - F_{\text{т}}. \tag{10}$$

Так как

$$F_{\text{выт}} = \rho_{\text{воз}} V g, \text{ а } F_{\text{т}} = \rho_{\text{г}} V g + m_{\text{об}} g,$$

где $\rho_{\text{воз}}$ — плотность воздуха, $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, V — объем вытесняемого газа (объем наполненного газом шара), $m_{\text{об}}$ — масса оболочки, то

$$F_{\text{п}} = \rho_{\text{воз}} V g - g(\rho_{\text{г}} V + m_{\text{об}}) = g[(\rho_{\text{воз}} - \rho_{\text{г}})V - m_{\text{об}}]. \tag{11}$$

Из выражения (11) видно, что подъемная сила будет тем больше, чем меньше плотность газа, заполняющего воздушный шар данного объема, и чем меньше масса оболочки шара.*

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. В воде плавает бревно. Какая часть объема бревна находится под водой? Плотности древесины и воды равны соответственно $\rho_д = 800$ кг/м^3 и $\rho_в = 1000$ кг/м^3.

Решение. Запишем условие плавания бревна:

$$F = F_{выт}.$$

Здесь $F = \rho_д V g$ — сила тяжести, действующая на бревно; V — его объем; $F_{выт} = \rho_ж V_п g$ — выталкивающая сила, действующая на бревно; $V_п$ — объем погруженной части бревна.

Таким образом, условие плавания примет вид:

$$\rho_д V g = \rho_ж V_п g.$$

Отсюда

$$\frac{V_п}{V} = \frac{\rho_д}{\rho_ж}; \; \frac{V_п}{V} = \frac{800\,\frac{кг}{м^3}}{1000\,\frac{кг}{м^3}} = 0{,}8.$$

Ответ: бревно плавает так, что в воде находится 0,8 его объема.

2. Масса оболочки, корзины и снаряжения воздушного шара равна 1 т. Объем шара 1700 м^3. Найдите массу полезного груза, который может поднять шар при заполнении оболочки гелием. Плотность гелия и воздуха равны 0,18 кг/м^3 и 1,29 кг/м^3 соответственно.

Решение. По формуле (11) подъемная сила воздушного шара равна:

$$F_п = g[(\rho_{воз} - \rho_г)V - m_{об}];$$

$$F_п = 9{,}8\,\frac{м}{с^2}\cdot\left[\left(1{,}29\,\frac{кг}{м^3} - 0{,}18\,\frac{кг}{м^3}\right)\cdot 1700\text{ м}^3 - 1000\text{ кг}\right] \approx 8700\text{ Н}.$$

Следовательно, искомая масса $m = \dfrac{F_п}{g}$; $m = \dfrac{8700\text{ Н}}{9{,}8\,\frac{м}{с^2}} \approx 890$ кг.

Ответ: масса полезного груза 890 кг.

Проверьте себя

1. Почему возникает выталкивающая сила?
2. Какие силы действуют на тело, погруженное в жидкость?
3. Сформулируйте закон Архимеда для тела, погруженного в какой-либо газ.

4. Приведите примеры из собственного опыта, указывающие на существование архимедовой силы.
5. Действует ли архимедова сила на тело в состоянии невесомости?
6. Под колоколом воздушного насоса находится подвешенный рычаг, на одном конце которого укреплен полый шар, а на другом — уравновешивающая его гирька. При откачивании воздуха из-под колокола равновесие рычага нарушилось — шар стал перетягивать гирьку (рис. 145). Почему?

Рис. 145

*7. Французский философ Вольтер пытался взвесить воздух. Для этого он надул воздухом бычий пузырь, взвесил его, затем выпустил воздух из пузыря и снова взвесил. Пустой и наполненный воздухом пузыри весили одинаково, из чего Вольтер сделал вывод о невесомости воздуха. В чем его ошибка?
8. Тело полностью погрузили сначала в чистую воду, а затем — в соленую. В какой воде на тело действовала бóльшая выталкивающая сила?
9. Три одинаковых цилиндра плавают в стаканах с разными жидкостями (рис. 146). У какой жидкости плотность больше?

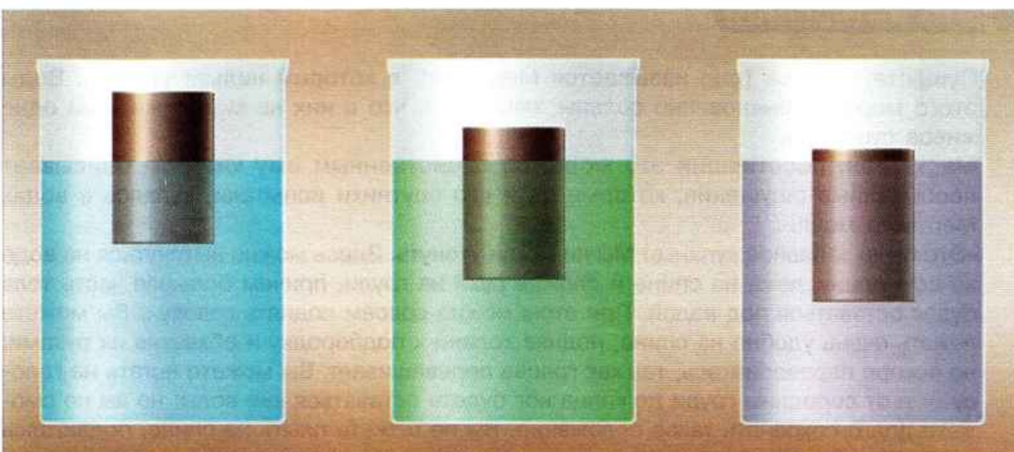


Рис. 146

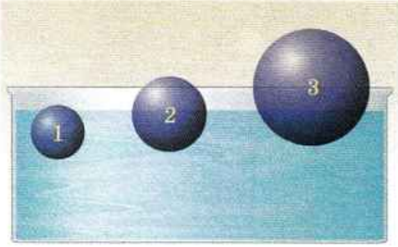


Рис. 147

10. На поверхности воды плавают три шара одинаковой массы, но разного объема (рис. 147). На какой шар действует со стороны воды бóльшая архимедова сила? Почему?
11. Почему тонет корабль, получивший пробоину?
12. Водоизмещение судна равно 100 тыс. т. Что это означает?
13. Пробковый пояс или спасательный круг надежно удержит человека в воде. Определите, какой груз выдержит спасательный пробковый круг объемом 100 $дм^3$. Плотность пробки равна 250 $кг/м^3$.
14. Вес фарфорового изделия в воздухе равен 23 Н, а погруженного в воду — 13 Н. Определите плотность фарфора.
15. Посмотрите внимательно на рисунок 144: нижнюю часть оболочки воздушного шара оставляют открытой. Поскольку легкий газ, заполняющий шар, не выходит из отверстия, значит, его давление в отверстии равно давлению атмосферного воздуха. Как же возникает архимедова сила, действующая на шар в полете?
16. В сосуде с водой плавает шар, наполовину погруженный в воду. Изменится ли глубина погружения шара, если сосуд с шаром перенести на планету, где ускорение свободного падения в два раза больше, чем на Земле?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Существует море (оно называется Мертвым), в котором нельзя утонуть. Воды этого моря необыкновенно солены, настолько, что в них не может жить ни одно живое существо.

Марк Твен, посетивший это море, со свойственным ему юмором описывает необычайные ощущения, которые он и его спутники испытали, купаясь в водах Мертвого моря.

«Это было забавное купанье! Мы не могли утонуть. Здесь можно вытянуться на воде во всю длину, лежа на спине и сложив руки на груди, причем большая часть тела будет оставаться под водой. При этом можно совсем поднять голову... Вы можете лежать очень удобно на спине, подняв колени к подбородку и обхватив их руками, но вскоре перевернетесь, так как голова перевешивает. Вы можете встать на голову — и от середины груди до конца ног будете оставаться вне воды; но вы не сможете долго сохранять такое положение. Вы не можете плыть на спине, подвигаясь сколько-нибудь заметно, так как ноги ваши торчат из воды, и вам приходится отталкиваться только пятками».

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 9

1. Гидро- и аэростатика изучают равновесие жидкости и газа и их действие на находящиеся в жидкости (газе) твердые тела.
2. Давление, оказываемое неподвижной жидкостью (гидростатическое давление), зависит от высоты столба жидкости и ее плотности:

$$p = \rho g h.$$

3. Атмосферное давление действует на поверхность Земли и на тела, находящиеся на ней.
   Нормальное атмосферное давление равно давлению столба ртути высотой 760 мм:

$$p_а = 101\ 325 \text{ Па}.$$

4. Внешнее давление, производимое на жидкость или газ, передается ими в каждую точку жидкости (газа) без изменения (закон Паскаля).
5. На всякое тело, погруженное в жидкость (или газ) со стороны этой жидкости (или газа) действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (или газа), направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема жидкости (или газа) (закон Архимеда).
6. На основании закона Архимеда рассчитывается выталкивающая сила, действующая на тела, погруженные в неподвижную жидкость (или газ), выясняются условия плавания тел.

глава 10

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебательное движение — одно из самых распространенных движений в природе и технике. Колебания встречаются практически везде. Колеблются деревья в лесу, пшеница в поле, трава на лугу. Колеблются струны музыкальных инструментов, мембрана телефона, диффузор громкоговорителя, фундаменты станков, пролеты мостов, поршни в двигателях внутреннего сгорания, иглы в швейных машинах, корпуса самолетов и ракет и т. д.

Колебательные, т. е. повторяющиеся движения, происходят и в жизни нашей планеты (землетрясения, приливы и отливы), и в астрономических явлениях (например, при солнечных пульсациях одно колебание совершается за 160 мин).

С колебаниями мы встречаемся даже в жизни нашего организма. Биение сердца, движение голосовых связок также являются примерами колебательного движения.

Колебания играют огромную роль в жизни человека. Без знания законов колебаний нельзя было бы создать радио, телевидение, многие современные устройства и машины. Колебания многогранны. Иногда они выступают как друг и помощник человека, а иногда как коварный враг. Неучтенные колебания могут привести к разрушению сложных технических сооружений, вызвать серьезные заболевания человека. Все это делает необходимым их изучение.

§ 38. Свободные колебания. Период и частота колебаний

Механическим колебанием называют движение тела или системы тел, периодически повторяющееся около одного и того же положения — положения равновесия. Колеблющееся тело никогда не бывает одно. Оно всегда связано с другими телами и вместе с ними образует систему тел, которую называют *колебательной системой*.

Все тела, показанные на рисунке 148, совершают периодически повторяющиеся движения: маятник в часах (рис. 148, *а*); упругий мячик, отскакивающий от асфальта (рис. 148, *б*); Земля, обращающаяся вокруг Солнца (рис. 148, *в*); качели (рис. 148, *г*); карусели (рис. 148, *д*); плывущий

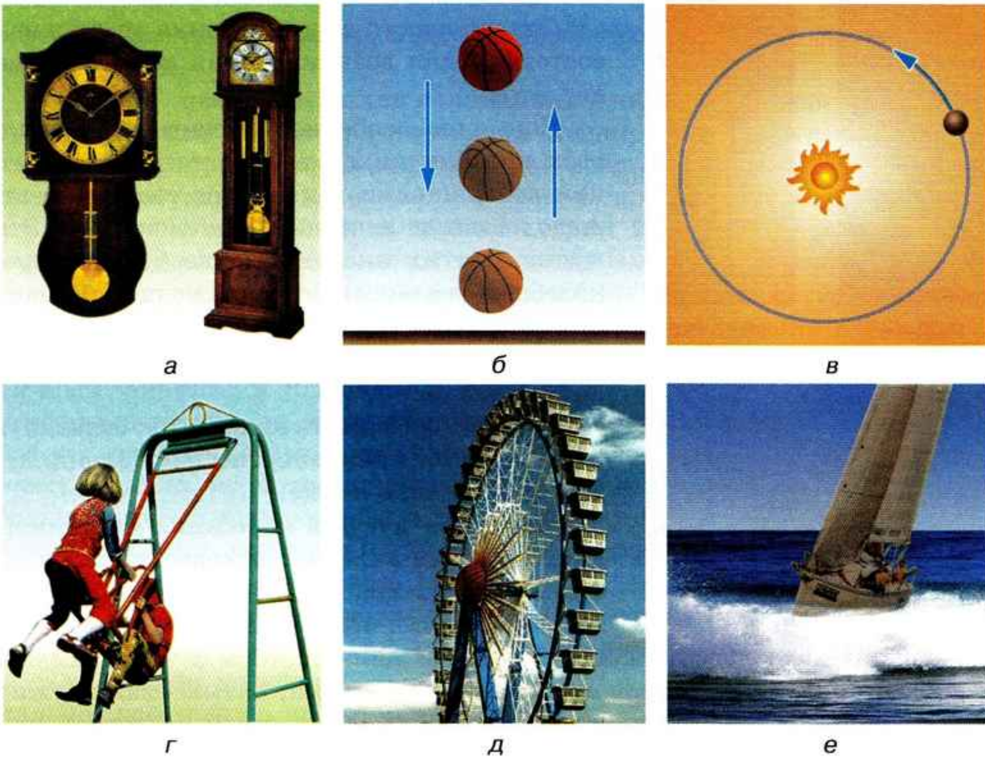


Рис. 148

парусник (рис. 148, *е*). Но не все эти движения являются механическими колебаниями, а соответствующая система тел — колебательной системой. Колебания совершают только маятник, мячик, качели и парусник. Какими общими отличительными свойствами обладают все колеблющиеся тела?

Каждая колебательная система обладает *состоянием устойчивого равновесия*, относительно которого и происходят колебания. У часового маятника, качелей и корабля — это вертикальное положение, у мячика — поверхность асфальта, на которой мячик лежит неподвижно. Важно, что при выведении тел из состояния устойчивого равновесия всегда появляется сила, направленная в противоположную смещению сторону и заставляющая их сначала остановиться, а затем вернуться в исходное устойчивое состояние.

И при обращении Земли вокруг Солнца (см. рис. 148, *в*), и при вращении каруселей (рис. 148, *д*) ни одно из их положений не является состоянием устойчивого равновесия, поэтому их движение хотя и периодическое, но не колебательное.

Рис. 149

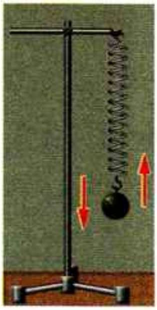


Рис. 150

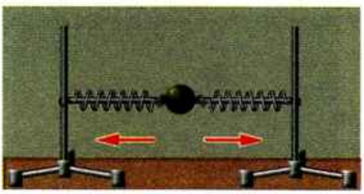


Рис. 151

Однако одного существования устойчивого состояния для возникновения колебаний недостаточно.

Еще одна особенность, характерная для всех колеблющихся тел, состоит в том, что при возвращении в исходное состояние эти *тела не могут мгновенно остановиться*. Этому мешает их инертность, не будь которой колебания не могли бы происходить. И маятник, и мячик, и качели, и корабль во время качки по инерции проскакивают свои положения равновесия.

Третью особенность колебаний, связанную с преобразованием энергии колеблющихся тел, рассмотрим позже.

Мы будем изучать колебания на примере двух простейших *моделей* колебательных систем. Одна из моделей называется *нитяным маятником* или просто *маятником*. Это груз, подвешенный на легкой жесткой нити и движущийся в вертикальной плоскости (рис. 149). Вторая колебательная система, называемая *пружинным маятником*, представляет собой груз, подвешенный на легкой пружине и совершающий колебания вдоль вертикальной прямой (рис. 150). На рисунке 151 показан также пружинный маятник, совершающий горизонтальные колебания.

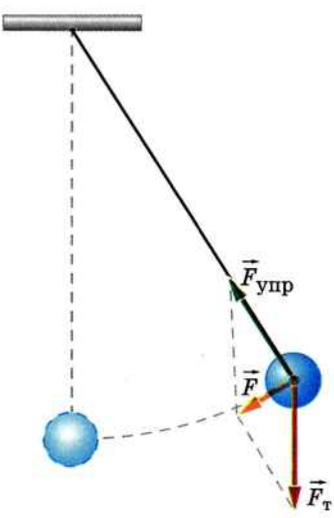


Рис. 152

Нетрудно усмотреть в этих моделях те две главные особенности любых колебательных систем, о которых говорилось выше, — существование у системы положения устойчивого равновесия и ее инертность. Например, если нитяной маятник вывести из состояния равновесия, то силой, возвращающей его в это состояние, будет равнодействующая $\vec{F}$ силы тяжести $\vec{F}_т$ и силы упругости $\vec{F}_{упр}$ натянутой нити (рис. 152), а у пружинного маятника — сила упругости пружин. Поэтому, если маятники толкнуть или плавно отвести из состояния равновесия и после этого предоставить самим себе, они будут в дальнейшем совершать колебания, которые называются *свободными* (или *собственными*) колебаниями.

Энергия, необходимая для совершения свободных колебаний, сообщается маятникам только при начальном толчке. Поэтому в реальных условиях из-за сопротивления окружающей среды свободные колебания постепенно затухают, и их размах с течением времени уменьшается.

Примерами свободных колебаний служат колебания струн музыкальных инструментов, возбуждаемых однократным щипком; струн рояля, возбуждаемых ударами молоточков при нажатии клавиш; поверхности воды в ведре; вагона или автомобиля на своих рессорах; стрелки компаса.

С колебательными системами приходится иметь дело не только в различных машинах и механизмах. Ими является, например, большинство источников звука, да и распространение звука в воздухе возможно лишь потому, что сам воздух представляет собой своего рода колебательную систему. Однако, несмотря на разнообразие и сложность реальных систем, в большинстве случаев основные закономерности их колебаний можно изучить, пользуясь всего двумя моделями — пружинным и нитяным маятником, о которых говорилось выше.

С основными кинематическими характеристиками колебательного движения вы познакомились в 7-м классе. Напомним их.

Амплитуда колебаний — это максимальное расстояние, на которое отклоняется колеблющееся тело от своего положения равновесия.

На рисунке 153 показаны смещение x и максимальное отклонение, т. е. амплитуда A колебаний нитяного маятника. Часто за амплитуду ошибочно принимают размах колебаний, который равен удвоенной амплитуде.

Период колебаний — это минимальный промежуток времени, по истечении которого колеблющееся тело возвращается в прежнее положение, т. е. это время, за которое совершается одно полное колебание.

Период колебаний можно найти по формуле:

$$T = \frac{t}{N}, \qquad (1)$$

где t — время, за которое произошло N колебаний.

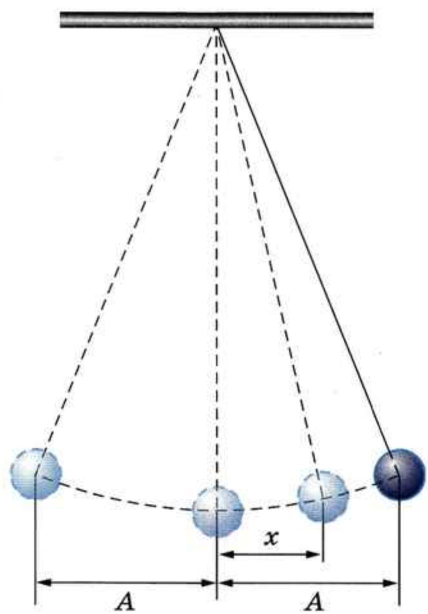


Рис. 153

Частота колебаний — это число полных колебаний, совершаемых за 1 с:

$$\nu = \frac{N}{t}. \qquad (2)$$

Единица частоты — г е р ц (Гц).

$$1\ \text{Гц} = 1\ \frac{1}{\text{с}}.$$

Период и частота — взаимно обратные величины:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Например, если период колебаний составляет 0,2 с, то, значит, колебательное движение тела повторяется через каждые 0,2 с. При этом частота колебаний равна $\frac{1}{0{,}2\ \text{с}} = 5\ \frac{1}{\text{с}} = 5$ Гц, т. е. за каждую секунду тело совершает 5 колебаний.

Частоту свободных колебаний называют *собственной частотой* колебательной системы.

Проверьте себя

1. Что такое механические колебания?
2. Какие системы, изображенные на рисунках 149—151 будут колебательными в состоянии невесомости? Почему?
3. Какие колебания называют свободными?
4. Назовите отличительные свойства колебательной системы.
5. Перечислите основные характеристики колебательного движения и дайте их определение.
6. Можно ли назвать свободными колебания: а) поплавка на волнах? б) струны скрипки, звучащей под смычком? в) грузовика, едущего по ухабам? г) иглы швейной машины? д) ветвей камертона? е) листьев на деревьях?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Амплитуда колебаний вершины Эйфелевой башни в Париже (высота 300 м) при сильном ветре составляет 50 см, а амплитуда колебаний вершины Останкинской телевезионной башни в Москве (высота 540 м) может превышать 4 м.

§ 39. График колебаний

Колебания тел можно «записать». С помощью установки, показанной на рисунке 154, мы это сделали в 7-м классе для нитяного маятника. Аналогичный опыт можно выполнить для пружинного маятника (рис. 155).

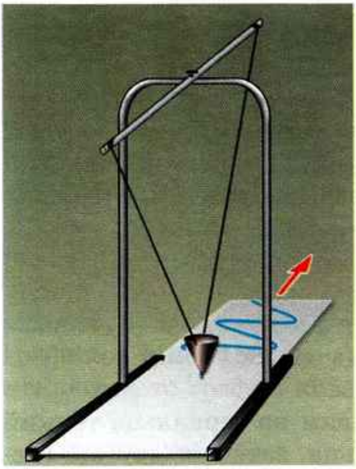


Рис. 154

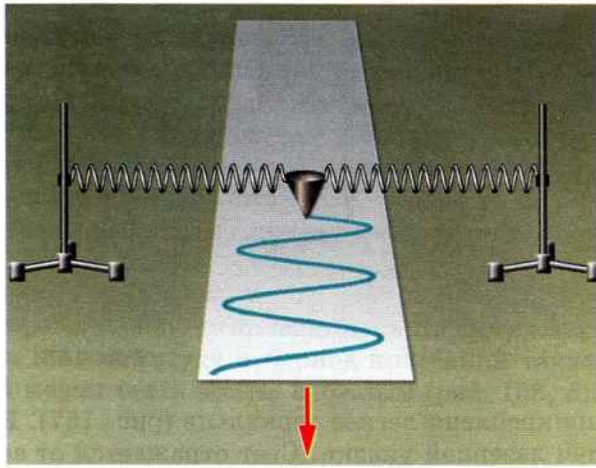


Рис. 155

При равномерном перемещении под колеблющимся телом бумажной ленты (или полосы картона) на ней получается кривая, которая называется *синусоидой*. Она представляет собой график зависимости смещения x от времени t (рис. 156), так как показывает, как с течением времени изменялось положение маятника x_{max} относительно положения равновесия.

Мы видим, что наибольшие смещения маятника x_{max} от положения равновесия в обе стороны одинаковы и $|x_{max}|$ представляет собой амплитуду колебаний. За время, равное периоду T, маятник совершил полное колебание и начал следующее.

*Синусоидальный график колебаний можно увидеть с помощью еще одной установки. Заставим звучать камертон, к одной из ветвей которого

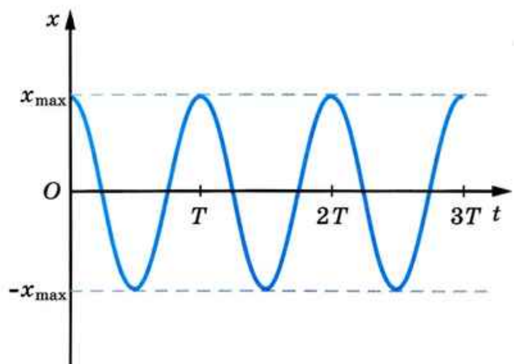


Рис. 156

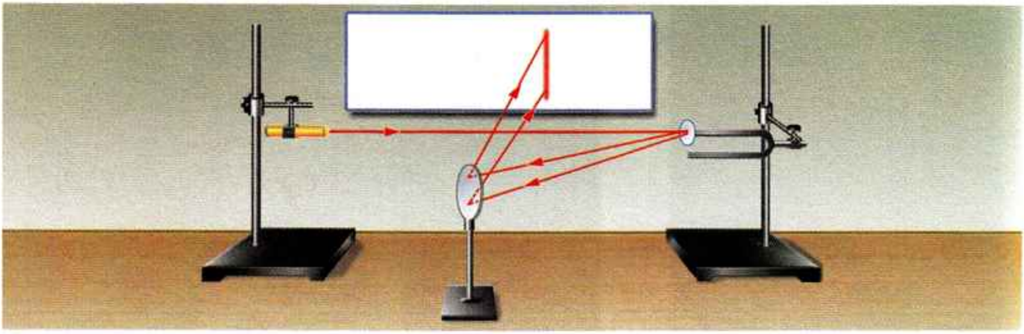


Рис. 157

прикреплено легкое зеркальце (рис. 157). Направим на зеркальце тонкий луч лазерной указки. Свет отражается от зеркальца, затем от другого (неподвижного) зеркала и попадает на экран. На экране образуется «зайчик» в виде красной вертикальной черточки. Если придержать пальцем камертон так, чтобы он перестал звучать, черточка превратится в круглое пятнышко. Вертикальная черточка получается, очевидно, из-за колебаний ветви камертона и прикрепленного к ней зеркальца. При этом меняются угол падения и угол отражения света, и луч, отбрасываемый от зеркальца, колеблется в вертикальной плоскости.

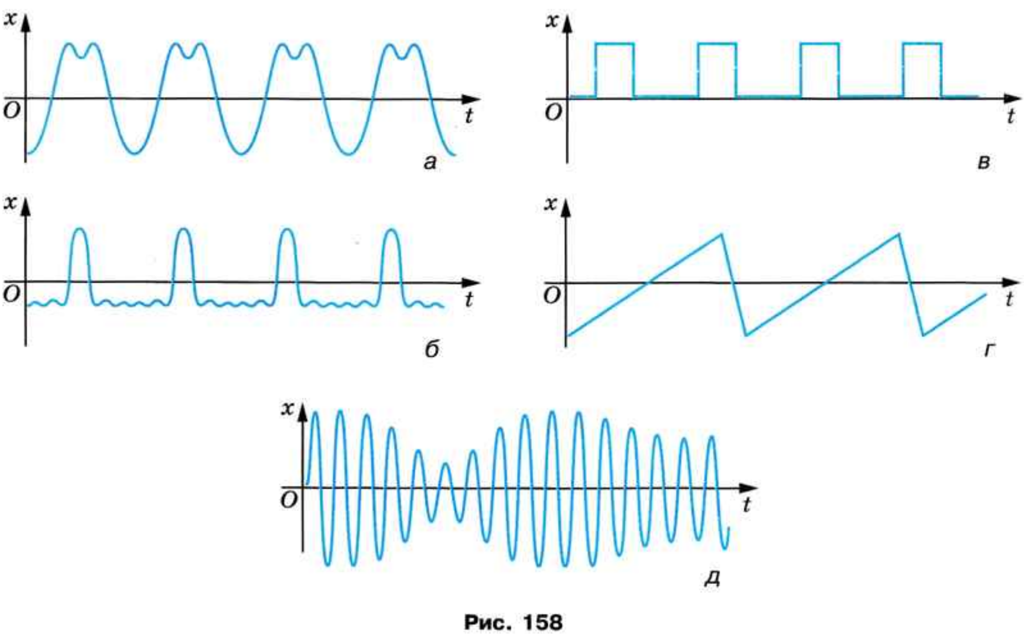


Рис. 158

Увидеть яркую красную синусоиду на экране можно, если, фиксируя свой взгляд на вертикальной черточке, быстро повернуть голову в сторону. Максимумы и минимумы синусоиды будут раздвинуты тем сильнее, чем быстрее поворачивать голову. Дело в том, что сетчатка глаза, на которой получается изображение зайчика, находящегося на экране, играет ту же роль, что и бумажная лента в опыте с маятником.*

Амплитуда и период колебаний не дают полного представления о характере периодического движения. Можно представить чрезвычайно разнообразные графики периодических движений, имеющих одинаковые амплитуду и период и в то же время сильно отличающихся по виду своих графиков (рис. 158, *а—г*). Если же амплитуда и период колебаний также меняются, то график колебаний может стать весьма сложным (рис. 158, *д*).

Проверьте себя

1. Какая кривая является графиком незатухающих свободных колебаний маятников и ветвей камертона?
2. По графику колебаний, приведенному на рисунке 159, определите период, амплитуду и размах колебаний маятника.
3. Сколько колебаний совершил маятник за 2,5 с (рис. 159)?

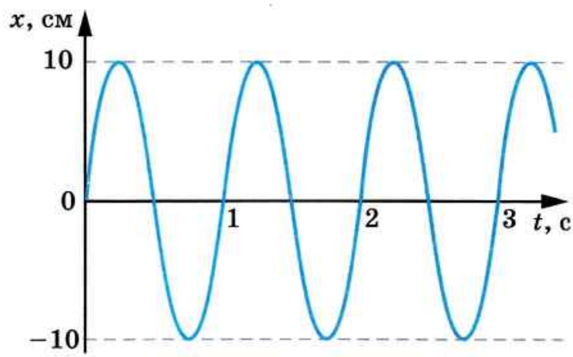


Рис. 159

4. Какую часть периода составило время движения маятника, если он отклонился от положения равновесия до крайнего положения? дошел до крайнего положения и вернулся в положение равновесия?

§ 40. Период колебаний нитяного маятника

Выясним, от чего может зависеть период колебаний нитяного маятника.

Подвесим свинцовый (или стальной) шарик на длинной легкой нити и, отведя нить на небольшой угол от вертикального положения, отпустим маятник. Маятник начнет совершать собственные колебания. Измерим период этих колебаний. Через некоторое время, когда амплитуда колебаний маятника заметно уменьшится, вновь определим период колебаний. Измерения показывают, что период колебаний остался прежним.

Таким образом, опыт свидетельствует, что период колебаний маятника при малых амплитудах колебаний не зависит от амплитуды.

Это свойство маятника впервые заметил Г. Галилей еще в 1655 г., наблюдая в Пизанском соборе качания большой люстры на длинной цепи, которую толкнули при зажигании. С течением времени размах качаний постепенно становился меньше, т. е. амплитуда колебаний уменьшалась, но период оставался одним и тем же. Обнаружив это, Галилей предложил использовать маятник для регулировки хода часов. Но ему самому сконструировать маятниковые часы не удалось.

Не меняя длину маятника, заменим свинцовый шарик таким же по размеру пластмассовым шариком, масса которого значительно меньше массы свинцового шарика, но заметно больше массы нити, и вновь повторим опыт. Период колебаний окажется таким же, как и в случае со свинцовым шариком. Опыт можно повторить с шариками из других материалов, результат будет одним и тем же. Следовательно, период колебаний маятника не зависит от массы груза.

Теперь будем изменять длину маятника. Ее измеряют от точки подвеса до центра тяжести груза и обозначают буквой l. Как показывает опыт, чем короче маятник, тем меньше период его колебаний, и, наоборот, чем длиннее маятник, тем период его колебаний больше.

В таблице 6 приведены результаты экспериментальных измерений, которые вы легко можете повторить, поскольку необходимые для этого приборы — измерительную ленту и секундомер — каждый из вас найдет у себя дома.

Таблица 6

№ опыта	Длина маятника, см	Период колебаний[1], с
1	25,0	1,00
2	50,0	1,42
3	100,0	2,01
4	150	2,45
5	200	2,84

[1] Для нахождения периода, соответствующего каждой длине маятника, измерялось время сорока его колебаний. Расчет периода производился по формуле (1) § 38.

От чего еще может зависеть период колебаний маятника? Казалось бы, у маятника кроме массы груза и длины нити нет каких-либо других параметров. Тем не менее такой параметр есть. Дело в том, что маятник движется под действием притяжения Земли (в условиях невесомости колебания прекращаются), поэтому можно предположить (выдвинуть гипотезу), что период колебаний маятника зависит от ускорения g свободного падения.

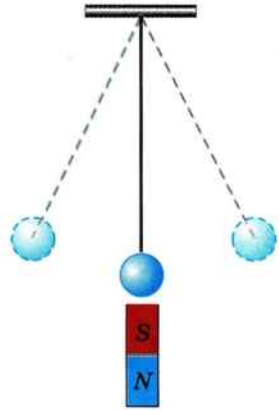


Рис. 160

На первый взгляд проверить эту гипотезу путем постановки экспериментов невозможно, ведь изменять величину $g \approx 9{,}8$ м/с^2 мы не в состоянии. Однако, если в качестве груза маятника использовать стальной шарик и подставить под него сильный магнит (рис. 160), что равносильно увеличению земного притяжения, то можно обнаружить уменьшение периода колебаний маятника. Этот опыт подтверждает нашу гипотезу.

Какова же окончательная зависимость периода колебаний нитяного маятника от l и g?

Математические расчеты, которые вы сможете выполнить в 10-м классе, приводят к следующему результату:

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

где $\pi \approx 3{,}14$, а g — ускорение свободного падения в том месте, где находится маятник.

Как и всякая теоретическая зависимость, эта формула выведена не для нитяного маятника, состоящего из нити и груза, а для какой-то его модели. В данном случае при расчетах груз считался сосредоточенным в одной точке, т. е. заменялся материальной точкой, нить считалась невесомой и абсолютно нерастяжимой, а угол отклонения нити от вертикали — малым. Такая теоретическая модель нитяного маятника называется *математическим маятником*.

Формула периода колебаний математического маятника впервые была установлена голландским ученым Х. Гюйгенсом.

Насколько хорошо формула Гюйгенса описывает зависимость периода колебаний от длины маятника, можно судить по рисунку 161. На нем точками нанесены экспериментальные данные, а сплошной линией — зависимость, полученная путем расчета по формуле при $g = 9{,}8$ м/с^2.

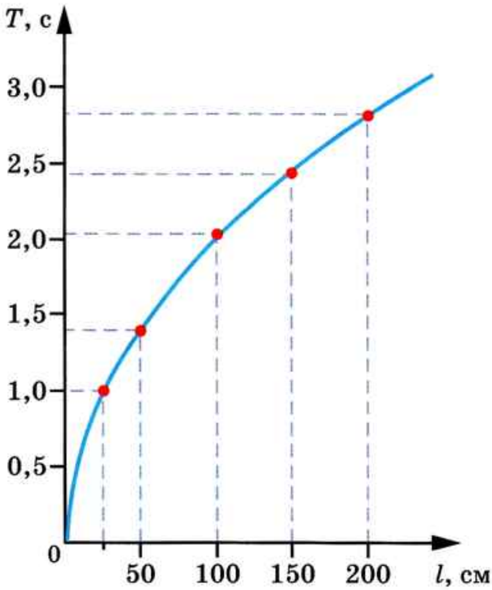


Рис. 161

*Первое практическое применение маятник нашел в часах благодаря Гюйгенсу. Оно основано на том, что в данном месте Земли при определенной длине маятника (например, 1 м) период его колебаний всегда один и тот же и не зависит от амплитуды колебаний, если она невелика. Следовательно, число колебаний этого маятника может служить для измерения интервалов времени.

Свободные колебания маятника часов из-за трения затухают, и энергию, необходимую для поддержания неизменной амплитуды колебаний, маятник получает от сжатой пружины или от поднятых гирь. Скорость хода часов регулируется изменением длины часового маятника с помощью небольшого грузика, например, гаечки, находящейся на нижнем конце маятника (рис. 162). Если часы спешат, то грузик или гаечку надо опустить вниз. Когда же часы отстают, гаечку надо подкрутить вверх.

Большое практическое значение маятник имеет для опытного определения ускорения свободного падения.

Из формулы Гюйгенса получаем

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2},$$

и для измерения значения g с помощью маятника одной и той же длины оказывается достаточно измерить период его колебаний в различных точках Земли.

Этот способ определения g очень удобен и дает весьма точный результат. Подобные измерения позволили уточнить наши представления о форме земного шара. При этом приходилось учитывать, что возвышенности на поверхности Земли, например горы, или тяжелые породы в земной коре могут изменить значение g, так как притягивают находящиеся поблизости тела в соответствии с законом всемирного тяготения. Это изменение обычно крайне мало, но вполне может быть замечено при современной точности измерений, которая достигает стомиллионной среднего значения ускорения свободного падения на Земле. И эта удивительная точность достигается не в лабораторных, а в полевых условиях!

Таким образом, для геологов нитяной маятник — один из приборов, помогающих им определять строение земной коры и отыскивать залежи руд.*

Рис. 162

Проверьте себя

1. Что называется математическим маятником?
2. Зависит ли период колебаний математического маятника от его массы? от амплитуды колебаний?
3. Как измерить период собственных колебаний нитяного маятника опытным путем?
4. При каких условиях для периода колебаний нитяного маятника можно пользоваться формулой Гюйгенса?
5. Стоя на одной ноге, покачайте, расслабив мышцы, другой и определите период ее свободных колебаний. Насколько уменьшится период, если ногу согнуть в колене, как это бывает при беге?

*6. Маятник, длина нити которого 80 см, совершает на Луне 27 полных колебаний за 2 мин. Чему равно ускорение свободного падения на Луне?

*7. Что нужно сделать с грузиком маятника, чтобы отрегулировать ход спешащих часов? отстающих часов? На каком свойстве маятника основана эта регулировка?

*§ 41. Период колебаний пружинного маятника

В предыдущем параграфе мы подробно рассмотрели нитяной маятник, являющийся моделью маятника, используемого в часах. Более широкое применение находит еще одна модель реальных колебательных систем — пружинный маятник. Эта модель подходит для описания колебаний листьев и колосьев; воздуха в органных трубах и в трубах духовых музыкальных инструментов; для расчета вибраций корпусов автомашин, укрепленных на рессорах; фундаментов зданий и станков. Ею пользуются для описания распространения звука в воздухе, в воде и в твердых телах; поглощения звука в стенах и уровня шума, создаваемого работающими механизмами, а также во многих других ситуациях.

Зависимость периода колебаний пружинного маятника от его свойств можно исследовать аналогично тому, как мы делали это для нитяного маятника. Для этого необходим набор грузов, комплект пружин разной жесткости (его можно заменить полосками резины разной длины) и секундомер.

Первая особенность пружинного маятника состоит в том, что в отличие от нитяного маятника период его колебаний не зависит от ускорения свободного падения. В этом нетрудно убедиться, используя известный вам метод «увеличения земного притяжения» за счет сильного магнита, подкладываемого под колеблющийся груз. Следовательно, пружинный маятник не пригоден для поиска месторождений железных руд. Более того, период его

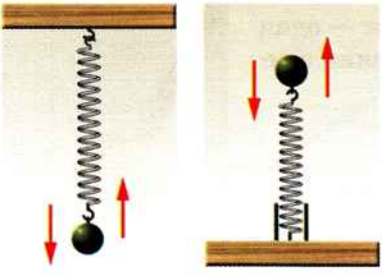


Рис. 163

колебаний остается неизменным и в космосе в состоянии невесомости.

Если найдется подходящая пружина, интересно понаблюдать за колебаниями подвешенного к ней груза (рис. 163, *а*), и такого же груза, прикрепленного к такой же пружине, стоящей на столе (рис. 163, *б*). Измерения показывают, что в обоих случаях при малых амплитудах период колебаний грузов один и тот же.

Вторую отличительную особенность колебаний пружинного маятника можно установить, постепенно увеличивая массу подвешенных к пружине грузов. При этом оказывается, что маятник колеблется все медленнее и медленнее, т. е. период его колебаний увеличивается.

Изменяется период колебаний и при смене пружин. Проведя серию измерений, легко обнаружить, что один и тот же груз быстрее колеблется на жесткой пружине (короткой резиновой полоске) и медленнее на мягкой (на длинной полоске).

Таким образом, период колебаний пружинного маятника не зависит от ускорения свободного падения и тем меньше, чем меньше масса груза и жестче пружина.

Точную теоретическую формулу периода колебаний пружинного маятника вы сможете вывести в 10-м классе. Она получается для модели, в которой пружина считается невесомой, а груз — материальной точкой. Модель называется так же, как и сам маятник, — *пружинным маятником*, а формула периода колебаний для такой модели имеет вид:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},} \qquad (1)$$

где m — масса груза, k — жесткость пружины.

Для реального пружинного маятника эта формула применима, если масса груза значительно превышает массу пружины и если растяжения (сжатия) x пружины невелики, так что для нее выполняется закон Гука: $F_{упр} = k|x|$.

Устройства, основанные на свойствах колебательных систем, моделью которых могут служить пружинные маятники, находят широкое применение при защите от сотрясений, когда для какого-нибудь прибора (или даже для целой комнаты) надо создать условия возможно полной неподвижности по отношению к зданию. Для этой же цели используются рессоры вагонов и автомобилей.

Проверьте себя

1. Каковы причины колебаний пружинного маятника?
2. Как зависит период колебаний пружинного маятника от массы груза? от жесткости пружины?
3. Как изменится период колебаний пружинного маятника, если массу груза увеличить в 4 раза? уменьшить в 4 раза?
4. Как изменится период колебаний пружинного маятника, если жесткость пружины увеличить в 4 раза? уменьшить в 4 раза?
5. Как изменится период колебаний пружинного маятника, если массу груза увеличить в 4 раза и одновременно увеличить в 4 раза жесткость пружины?
6. Можно ли использовать пружинный маятник для измерения ускорения свободного падения?

*7. В классе измерьте период ваших колебаний на длинной сосновой доске, положенной на опоры. Сравните полученный результат с расчетом по формуле (1) § 40. При этом жесткость сухой сосновой доски в ньютонах на метр можно найти из выражения, полученного опытным путем:

$$k = \frac{36 \cdot 10^9 \cdot h^3 b}{l^3}$$

где l — длина, h — толщина, b — ширина доски, выраженные в метрах.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Поскольку рычажные весы в условиях невесомости неприменимы, для контроля своей массы во время длительных полетов космонавты пользуются пружинным маятником. «Взвешивание» производится на специальном одноногом пружинном табурете, устройство которого понятно из рисунка 164. Лежа на табурете и ухватившись руками за сиденье, космонавт измеряет период своих колебаний. Затем с помощью формулы (1) § 40 вычисляется масса M «груза», равная сумме масс сиденья и космонавта (жесткость пружины k должна быть известна).

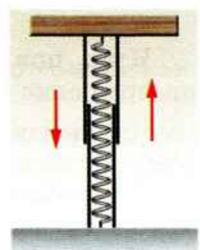


Рис. 164

§ 42. Превращение энергии при колебаниях

Чтобы привести в колебания нитяной маятник, отведем его на небольшой угол ($\alpha \approx 5°$) от положения устойчивого равновесия (рис. 165). При этом маятник приобретает потенциальную энергию:

$$E_p = mgH_{\max},$$

где $H_{\max}$ — высота подъема груза над уровнем устойчивого равновесия.

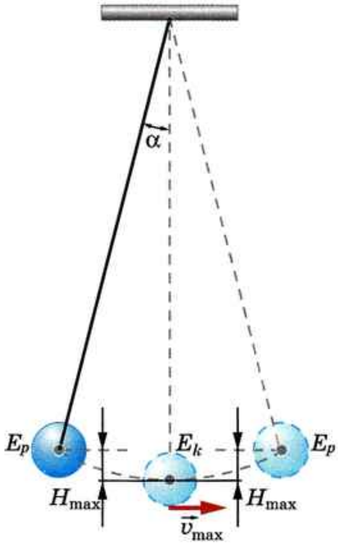


Рис. 165

Отпустим маятник. Под действием силы тяжести и силы упругости нити маятник будет двигаться к положению равновесия. При этом его потенциальная энергия будет уменьшаться, а кинетическая энергия вместе со скоростью будет возрастать. В момент прохождения маятником положения равновесия потенциальная энергия маятника обратится в нуль, а кинетическая энергия будет максимальной:

$$E_k = \frac{mv_{max}^2}{2},$$

где v_{max} — максимальное значение скорости движения груза, подвешенного к нити. При дальнейшем движении скорость и кинетическая энергия груза будут уменьшаться, а потенциальная энергия — возрастать. Дойдя до крайнего правого положения, маятник остановится и начнет двигаться в обратном направлении.

В отсутствие сил трения для нашей колебательной системы выполняется закон сохранения энергии — максимальное значение потенциальной энергии равно максимальному значению кинетической энергии:

$$mgH_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2}.$$

Итак, при свободных колебаниях маятника происходит периодическое превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно:

$$E_p \to E_k \to E_p \to E_k \to E_p \to ...$$

Это справедливо и для пружинного маятника, если массой пружины можно пренебречь по сравнению с массой груза. Потенциальная энергия колебательной системы в любой момент времени в этом случае равна соответственно потенциальной энергии деформированной пружины, а кинетическая энергия — кинетической энергии груза.

Периодически повторяющиеся переходы энергии из одного вида в другой и обратно, сопровождающие колебания маятников, характерны для любых колебаний вообще и являются такой же их отличительной особенностью, как наличие положения устойчивого равновесия, инертность и малое трение.

Если бы не было трения, энергия колебательной системы оставалась бы постоянной, и колебания продолжались бы бесконечно. Однако в реальных земных условиях полностью исключить трение невозможно, и, как показывает опыт, амплитуда любых свободных колебаний с течением времени всегда уменьшается. Это происходит потому, что полная механическая энергия колебательной системы, сообщенная ей в начальный момент, постепенно уменьшается, преобразуясь во внутреннюю энергию за счет трения. Сила трения всегда направлена в сторону, противоположную движению, поэтому она уменьшает амплитуду колебаний. Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени, называются *затухающими*.

Проверьте себя

1. В каких точках траектории груз маятника обладает только потенциальной энергией?
2. В каких точках траектории груз маятника обладает только кинетической энергией?
3. Что происходит с полной механической энергией колеблющегося тела при наличии трения?
4. Как меняется с течением времени амплитуда свободных колебаний?
5. Почему уменьшается скорость нитяного маятника после прохождения положения равновесия?
6. Сколько раз за время, равное периоду колебаний, происходит полное преобразование энергии маятника из одного вида в другой?

§ 43. Вынужденные колебания. Резонанс

Колебания, происходящие под действием внешних, периодически изменяющихся сил, называют *вынужденными*.

Когда вы слышите, что мимо вашего дома проезжает тяжелый грузовик, колебания воздуха в ваших ушных раковинах вынужденные. Они создаются вибрациями двигателя и кузова грузовика.

Когда вы говорите по телефону, воздух совершает вынужденные колебания под действием голосовых связок, колебания воздуха передаются мембране микрофона, которая тоже приходит в вынужденные колебания.

Вынужденные колебания совершает диффузор работающего громкоговорителя. Вибрации корпусов работающих машин и механизмов — это тоже вынужденные колебания.

При вынужденных колебаниях энергия от источника внешней периодической силы поступает непрерывно, поэтому, в отличие от свободных колебаний, постоянно происходит восполнение потерь механической энергии, вызванных трением. Вследствие этого вынужденные колебания оказываются *незатухающими*. При свободных же колебаниях запас

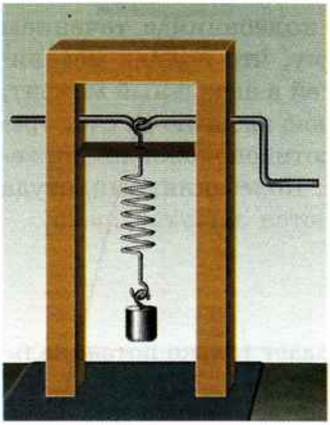


Рис. 166

энергии сообщается системе только в начале движения, и движение продолжается лишь до тех пор, пока этот запас не исчерпается.

Прикрепим верхний конец пружинного маятника к «колену» изогнутой оси (рис. 166). Если вращать ось с помощью рукоятки с постоянной скоростью (частотой), то и маятник начнет колебаться с той же частотой. Это происходит потому, что маятнику в процессе вращения изогнутой оси передается действие периодически изменяющейся силы со стороны колена. Изменяясь с частотой вращения колена, эта сила заставляет маятник совершать вынужденные колебания с той же частотой.

Впрочем, не надо думать, что вынужденные колебания совершают только колебательные системы. Если вы возьмете в руку любой предмет (хотя бы карандаш) и приведете его в периодическое (например, возвратно-поступательное) движение, то это тоже будет вынужденное колебание и совершаться оно будет с частотой движения вашей руки.

Частота вынужденных колебаний любой колебательной системы всегда совпадает с частотой изменения внешней силы.

С этой закономерностью знаком каждый, кто качался в лодке на волнах или ездил в автобусе по ухабистой дороге.

Вынужденные колебания широко применяются в различных вибрационных машинах, с помощью которых уплотняют грунт и бетон, забивают сваи в твердый грунт, бурят горные породы, прокладывают водопроводные трубы под землей.

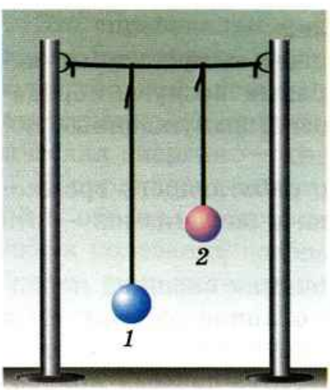


Рис. 167

Продолжим изучение вынужденных колебаний. Для этого воспользуемся установкой, изображенной на рисунке 167. Длина маятника *2* неизменна. Следовательно, он имеет определенную частоту колебаний (собственную частоту). Длину маятника *1* можно менять. При изменении длины маятника *1* меняется его собственная частота.

Отклоним маятник *1* от положения равновесия и предоставим его самому себе — он будет совершать свободные колебания. Это вызовет колебания шнура, на котором висят оба маятника, в результате чего на маятник *2* через его точку подвеса начнет действовать вынуждающая сила, периодически изменяющаяся с частотой колебаний маятника *1*. Под действием этой силы маятник *2* начнет совершать вынужденные колебания. Будем медленно уменьшать длину маятника *1*, наблюдая за амплитудой колебаний маятника *2*. (Из-за потери энергии амплитуда колебаний маятника *1* будет постепенно уменьшаться, поэтому время от времени его надо подталкивать, восполняя эту потерю.)

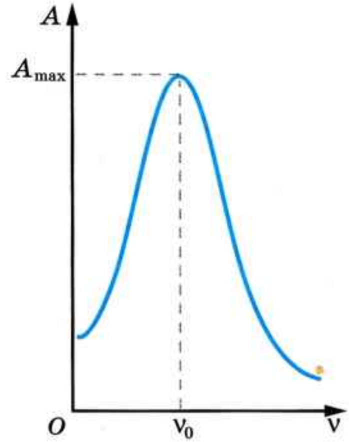


Рис. 168

Мы заметим, что маятник *2* раскачивается все сильнее и сильнее и, когда длина маятника *1* станет равной длине маятника *2*, амплитуда установившихся вынужденных колебаний маятника *2* достигнет максимального значения. Совпадение длин маятников в этот момент указывает на то, что частота ν вынуждающей силы (т. е. частота колебаний маятника *1*) совпадает с частотой собственных колебаний ν_0 маятника *2*.

Если продолжить уменьшение длины маятника *1*, то мы увидим, что амплитуда вынужденных колебаний маятника *2* начнет уменьшаться.

На рисунке 168 приведен примерный график зависимости амплитуды A установившихся вынужденных колебаний второго маятника от частоты ν колебаний первого маятника. На горизонтальной оси отмечена также частота ν_0 собственных колебаний второго маятника. При совпадении частот колебаний ($\nu = \nu_0$) амплитуда вынужденных колебаний максимальна ($A = A_{max}$).

Резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты внешнего воздействия к собственной частоте колебательной системы называется *резонансом*.

Проверьте себя

1. Что такое вынужденные колебания?
2. Приведите примеры вынужденных колебаний.
3. Чему равна частота вынужденных колебаний?
4. В чем состоит явление резонанса?
5. На туго натянутой бечевке подвешен массивный маятник *1* и легкие маятники различной длины (рис. 169). Какой из маятников будет колебаться в резонанс с маятником *1*, если последний привести в свободные колебания? Почему?

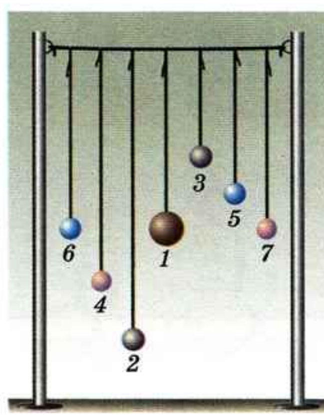


Рис. 169

*§ 44. Акустический резонанс

Резонанс, о котором мы рассказали в опыте с маятниками (см. рис. 167), наблюдается и в звуковых явлениях.

Проделаем такой опыт. Установим рядом два камертона, имеющих одинаковую собственную частоту колебаний (рис. 170, *а*). Возбудим камертоны, ударив по ним молоточком. При этом оба они звучат одинаково или, как говорят, в унисон.

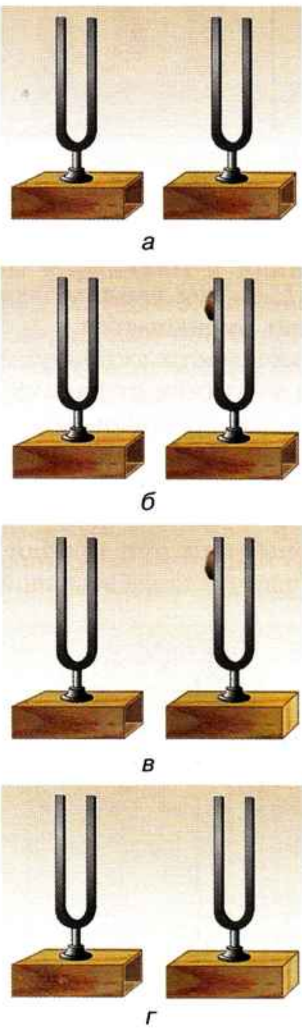


Рис. 170

Увеличим массу одного из камертонов, например, правого, прилепив к одной из его ножек кусочек пластилина (рис. 170, *б*). Камертоны будут «расстроены» по отношению друг к другу. Если по ним ударить, они издадут звуки различной высоты.

Проделаем теперь следующий опыт. Расположим камертоны так, чтобы отверстия их резонаторов (ящиков) оказались напротив друг друга (рис. 170, *в*). Ударом молоточка возбудим левый (ненагруженный) камертон. Через несколько секунд, коснувшись камертона рукой, прекратим его звучание. Наступит полная тишина, молчит не только левый, но и правый камертон: он не откликнулся на звучание левого.

Повторим опыт, ударив сильнее по левому камертону. Он будет издавать гораздо более громкий звук. Тем не менее и на этот раз правый камертон не откликается на звучание левого.

Поставим заключительный опыт. Снова настроим камертоны в унисон, сняв пластилин с правого камертона (рис. 170, *г*). Ударим — не очень сильно — по одному из камертонов и, дав ему прозвучать некоторое время, заглушим его рукой. Мы продолжаем отчетливо слышать звук той же высоты, хотя и менее громкий, — это звучит второй камертон. Он теперь откликается на колебания первого камертона. Почему он звучит, ведь его колебания не возбуждались ударом молоточка?

В этом случае возникает явление, аналогичное вынужденным колебаниям маятника *2* (см. рис. 167). Маятник *2* приходит в движение благодаря действию на него маятника *1*, передаваемому через шнур, на котором они подвешены. Чем ближе собственная частота колебаний маятника *2* к частоте вынужденных колебаний (ее мы меняли, уменьшая амплитуду маятника *1*), тем больше амплитуда колебаний маятника *2*.

В 7-м классе вы узнали, что основным излучателем звука, который издает камертон, являются не его колеблющиеся ветви, а воздух внутри его ящика (резонатора). Длина резонатора специально делается такой, чтобы собственная частота колебаний воздушного столба совпадала с частотой собственных колебаний ветвей камертона. При колебаниях ветвей воздушный столб совершает вынужденные колебания, но звук, издаваемый столбом, значительно громче звука, издаваемого самими ветвями[1]. Усиление звука обусловлено большими размерами излучающего отверстия резонансного ящика по сравнению с размерами ветвей камертона.

В третьем из поставленных нами опытов второй камертон и воздушный столб в его резонаторе совершают вынужденные колебания, возбуждаемые дошедшими до них колебаниями воздушного столба в резонаторе первого камертона. Небольшая разность между частотами камертонов во втором опыте приводит к тому, что один камертон не откликается на колебания другого.

С камертоном может резонировать не только другой камертон, но, например, воздушные столбы в трубах. Поднесем возбужденный камертон к стеклянной трубке, опущенной в сосуд с водой (рис. 171). Поднимая или опуская трубку, т. е. изменяя высоту столба воздуха в ней, мы заметим, что при некоторой длине воздушного столба он начинает громко звучать. Это значит, что наступил резонанс, т. е. частота собственных колебаний воздушного столба совпала с частотой колебаний камертона. Если увеличить или уменьшить найденную длину столба воздуха в трубке, то громкость его звучания ослабнет. Подобно открытому с одной стороны ящику камертона, открытая

Рис. 171

[1] Чтобы услышать слабый звук, издаваемый колеблющимися ветвями, нужно вынуть камертон из резонатора.

с одного конца трубка является резонатором. Такими же резонаторами служат трубы духовых инструментов, трубы органа, корпуса скрипок и других струнных инструментов.

Опыт показывает, что каждая воздушная полость с отверстием (например, бутылка или колба) является акустическим резонатором и может служить для усиления звуковых колебаний. Звучание воздуха в бутылке вы можете услышать, прислонив ее горлышко к губам и дунув вдоль его отверстия. Подобные резонаторы использовались, например, в старых храмах и театрах, в стены которых замуровывали пустые глиняные горшки или кувшины (голосники), обращенные горлышками внутрь помещения. Например, в знаменитой церкви Василия Блаженного в Москве и сейчас еще можно увидеть в башне такие кувшины. Если говорить в помещении, где есть голосники, голос звучит ясно и сильно. Если поет несколько человек, то кажется, что поет целый хор.

Человек также имеет собственный резонатор — это полость рта, усиливающая звуки, создаваемые голосовыми связками. Этим резонатором человек пользуется активно, изменяя его размеры в соответствии с высотой звуков.

Проверьте себя

1. Что такое акустический резонанс?
2. Для чего камертон снабжен резонансным ящиком?
3. Почему звучащий камертон вызывает звучание стоящего рядом второго такого же камертона?
4. Почему не звучит камертон, возбуждаемый стоящим рядом таким же камертоном, если к одной из ветвей первого камертона прикреплен кусочек пластилина?
5. Опишите явления, происходящие при поднесении звучащего камертона к трубке, опущенной в сосуд с водой.

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

• Прекрасными резонаторами являются воздушные пузырьки в воде. Резонансная частота колебаний пузырька обратно пропорциональна его радиусу, и на этом основан один из методов поиска рыбы. Плавательные пузыри рыб ведут себя подобно пузырькам. Посылая в глубину моря звуковой импульс с определенной частотой колебаний и анализируя амплитуду отраженного импульса, рыбопоисковое судно может обнаружить скопление рыб с плавательными пузырями резонансного размера и сделать предположение о количестве рыб в косяке и их размерах.

• Воздушные пузырьки не только усиливают, но и поглощают падающий звук, причем делают это довольно активно. Такого поглощения, например, достаточно, чтобы лишить звона чоканье бокалов с газированной водой. Без поглощения звон бокалов был бы таким же, как в воде без пузырьков.

• Резонансные свойства акустических резонаторов можно использовать для создания музыкального инструмента, например ксилофона, из бутылок с водой (рис. 172). Чем выше уровень воды и меньше воздуха в бутылке, тем больше частота звука (высота тона), возникающего вследствие колебаний частиц воздуха при ударе по бутылке. Настроив звучание каждой бутылки в унисон со звучанием какого-нибудь музыкального инструмента, нетрудно сыграть на ксилофоне любимую мелодию. Известно, что американский ученый Б. Франклин еще в XVIII веке создал музыкальный инструмент из бокалов.

Рис. 172

*§ 45. Учет и использование резонанса в быту и в технике

Явление резонанса может играть в жизни человека как положительную, так и отрицательную роль.

Например, ритм шагов человека, идущего по доске, перекинутой через ров, может попасть в резонанс с собственными колебаниями системы (доски с человеком на ней), и тогда доска начнет сильно колебаться (изгибаться вверх и вниз). Поезда, как правило, движутся по мостам с пониженной скоростью, чтобы интервал между ударами колес о стыки рельсов был значительно больше периода собственных колебаний моста. Иногда применяют обратный способ расстройки периодов: поезда проносятся через мосты на максимальной скорости.

Случается, что частота ударов колес на стыках рельсов совпадает с частотой колебаний вагонов на рессорах, и вагон тогда очень сильно раскачивается. Корабль также имеет свой период качаний на воде. Если морские волны попадают в резонанс с колебаниями корабля, то качка становится особенно заметной. Капитан меняет тогда скорость корабля или его курс.

Неуравновешенность машин и двигателей (недостаточная центровка деталей, прогиб вала) является причиной того, что при работе этих машин возникает периодическая сила, действующая на опору машины — фундамент, корпус корабля и т. п. Период изменения силы может совпасть при этом с периодом свободных колебаний изгиба самого вращающегося вала. Возникает резонанс, и вынужденные колебания могут быть настолько сильны, что разрушают фундамент, ломают валы и т. д. В таких случаях принимают специальные меры, чтобы избежать резонанса или ослабить его действие (расстройка периодов, увеличение затухания и др.).

Для того чтобы с помощью наименьшей периодической силы получить определенный размах вынужденных колебаний, нужно действовать в резонанс. Тяжелый язык большого колокола может раскачать даже ребенок, если он будет натягивать веревку с периодом собственных колебаний языка. Но самый сильный человек не раскачает язык, дергая веревку не в резонанс. По той же причине сравнительно легко раскачать качели на их резонансной частоте, действуя в такт с колебаниями, но если вы будете пытаться раскачивать их с частотой, скажем, вдвое большей, то быстро устанете, а качели практически не сдвинутся с места.

Даже во время обычной ходьбы каждый человек пользуется резонансом, не подозревая об этом. Наши ноги — маятники, имеющие период и частоту собственных колебаний. При спокойной ходьбе мы переставляем ноги именно с этой частотой и расходуем для этого минимальную энергию. Если требуется идти быстрее, человек прежде всего увеличивает ширину шага, а не темп ходьбы. Скорость движения при этом возрастает, а резонансная частота колебаний ноги изменяется очень мало, поскольку слабо зависит от размаха колебаний. Увеличение темпа ходьбы сильно утомляет именно потому, что наступает расстройка частоты собственных колебаний ног с частотой приложения мышечных усилий. Это учитывают марафонцы — ходоки на длинные дистанции, вырабатывающие во время тренировок тот период перестановки ног, который требует от них наименьших усилий.

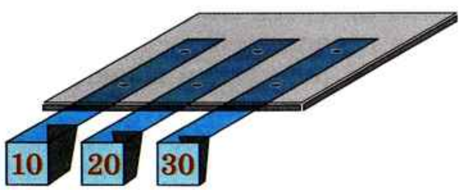


Рис. 173

Явление резонанса можно использовать для измерения частоты колебаний. Например, для определения частоты вращения двигателя применяют приборы — частотомеры. Схему работы частотомера можно проиллюстрировать рисунком 173. Частотомер представляет собой основание, на котором укреплены упругие пластины с грузиками, имеющие разную частоту собственных колебаний (в нашем примере 10, 20, 30 Гц). Если основание частотомера закрепить на двигателе, то вынуждающая сила, действующая со стороны двигателя, вызовет вынужденные колебания пластин. При совпадении частоты работы двигателя с собственной частотой какой-либо пластины наступит резонанс.

При колебании пластины ее торцовая часть видна в виде размытой вертикальной полоски. Измеряемая частота совпадает с частотой колебаний той из пластин, амплитуда колебаний которой наибольшая.

Особенно широко используется явление резонанса в радиотехнике: настройка радиоприемника на волну определенной радиостанции осуществляется с помощью резонанса.

Действие оптических квантовых генераторов — лазеров — было бы невозможно без использования явления резонанса.

Явление резонанса может стать настоящим бедствием, если трение в колебательной системе мало, а частота вынуждающих колебаний совпадает с частотой свободных колебаний. В этом случае амплитуда вынужденных колебаний достигает больших значений, что может вызвать разрушение сооружений.

История знает немало примеров, когда источником опасных колебаний механических сооружений были люди, идущие в ногу. Так, в 1831 году был разрушен мост в Манчестере, когда по нему, шагая в ногу, проходили строем 60 солдат. Причина этого заключалась в том, что частота ударов солдатских ног случайно совпала с частотой свободных колебаний моста. Аналогичный случай произошел в Петербурге: в 1905 году был разрушен мост через Фонтанку, когда по нему проходил эскадрон гвардейской кавалерии, и частота ударов конских копыт совпала с частотой собственных колебаний моста. Цепи, на которых висел мост, разорвались, и произошла трагедия — мост обрушился. С этих пор во всех странах мира запрещено ходить по мостам «в ногу».

Проверьте себя

1. Приведите примеры использования резонанса в технике.
2. Назовите опасные резонансные явления.
3. Как можно предотвратить явление резонанса?

ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Известно, что первые реактивные самолеты, набирая скорость, близкую к скорости звука (1200 км/ч), разрушались из-за резонансного возрастания амплитуды колебаний крыльев под действием воздушного потока. Это явление было устранено, когда конструкторы предложили поместить в крыле дополнительный груз, что привело к изменению собственной частоты колебаний крыльев.

§ 46. Механические волны

Распространение колебаний. Отдельные изолированные системы, колебания в которых мы рассматривали до сих пор, встречаются значительно реже, чем связанные колебательные системы. Как показывает опыт, в случае связанных колебательных систем колебания передаются от одной системы к другой.

Например, бросив в воду камень, мы увидим, как от места падения расходятся круги. Нам кажется, что это вода распространяется во все стороны. Но если мы понаблюдаем за движением поплавка, находящегося недалеко от упавшего камня, то заметим, что поплавок поднимается и опускается, но не движется по направлению распространения кругов воды.

Возникшие в одном месте колебания частиц воды передаются соседним участкам и постепенно распространяются во все стороны, вовлекая в колебательное движение все новые и новые частицы среды. Течение же воды не возникает: перемещается лишь форма ее поверхности.

Подобным же образом ведут себя буквы строки, бегущей по световой рекламе. Издали кажется, что буквы движутся по рекламе, однако это впечатление обманчиво. На самом деле лампочки, формирующие очертания букв, остаются на месте. Когда в каком-то месте рекламы лампочки гаснут, в соседнем месте зажигаются точно такие же, но уже другие лампочки.

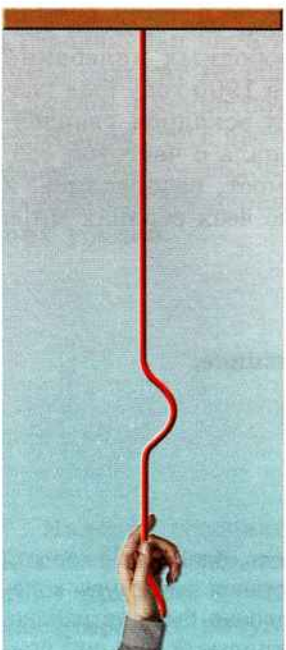


Рис. 174

Таким образом, говоря о распространении колебаний, имеют в виду не общее перемещение частиц среды, а лишь передачу колебательного процесса от одних частиц среды другим. Эта передача возможна, только если частицы связаны друг с другом. Тогда колебание, вызванное каким-либо образом в одном месте, повлечет за собой последовательное возникновение колебаний в других местах, все более и более удаленных от первоначального.

Процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени называется *волной*.

Обратите внимание на то, что говорится именно о распространении, а не о движении колебаний или волны. Среда при этом остается на месте.

*Прикрепим к потолку длинный резиновый шнур и резким движением руки заставим его свободный конец совершить одно колебание. Мы увидим, что вдоль шнура побежит волна (рис. 174).

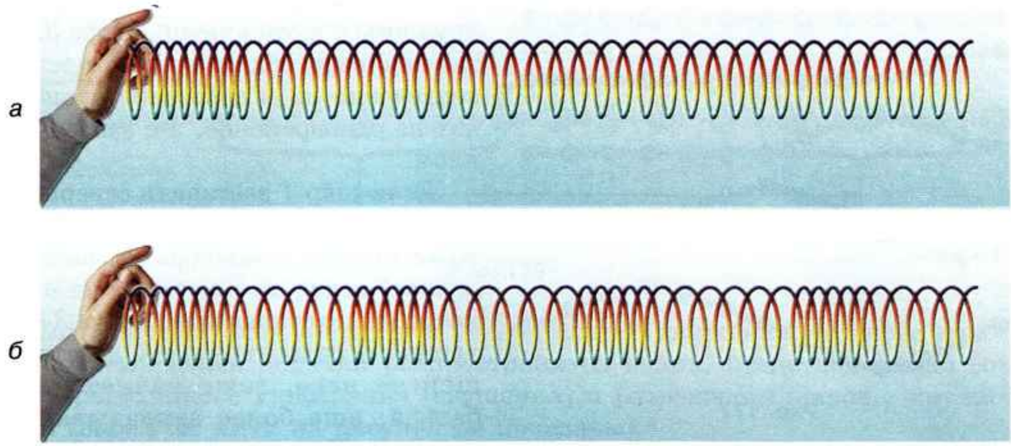


Рис. 175

И в этом случае участки шнура не перемещаются вместе с волной, а смещаются в ту или иную сторону относительно своего положения равновесия.

Теперь рассмотрим опыт с пружиной, подвешенной на длинных нитях (рис. 175; нити на рисунке не показаны).

Если по одному концу пружины ударить ладонью (рис. 175, *а*), то от удара несколько витков пружины сблизятся, а соседние витки разойдутся. Производя периодические удары, можно возбудить в пружине волну, представляющую собой последовательные сжатия и растяжения пружины (рис. 175, *б*).

Чтобы понять, каким образом механические колебания от одной колебательной системы передаются другой, связанной с ней (например, вдоль резинового шнура или пружины), рассмотрим процесс образования волны с помощью модели. Модель представляет собой цепочку одинаковых металлических шаров, подвешенных на нитях. Шары связаны между собой пружинами (рис. 176).

Если отклонить от положения равновесия в горизонтальной плоскости левый крайний шар, его пружина деформируется и на шар *2* начнет действовать сила упругости, заставляя его отклоняться в ту же сторону, в которую был отклонен шар *1* (рис. 177, вид сверху). Это приведет к деформации следующей

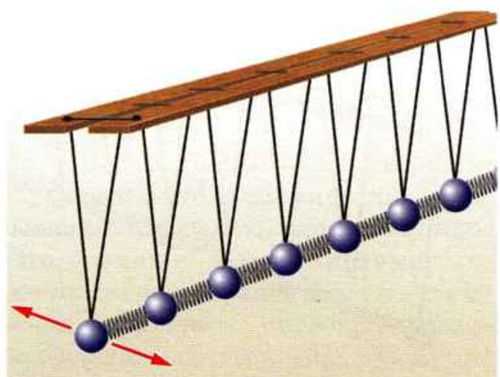


Рис. 176

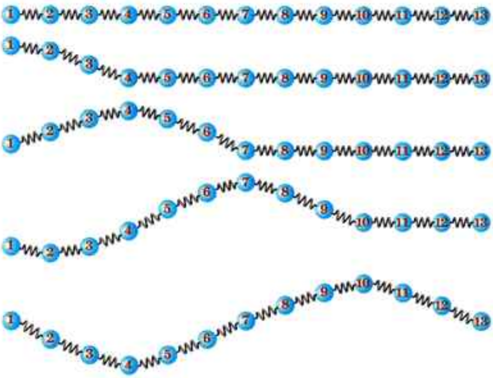


Рис. 177

пружины и к отклонению шара *3*. Но так как шары обладают инертностью, вовлечение их в движение происходит не одновременно, а с запаздыванием.

Если шар *1* заставить совершать колебательное движение, то шар *2* тоже придет в колебание (вынужденное) вслед за шаром *1*, но с некоторым отставанием. Шар *3* под влиянием силы упругости, действующей на него, тоже начнет колебаться, еще более запаздывая во времени. Наконец, все шары станут колебаться с одной и той же частотой, но поскольку колебания шаров отстают друг от друга, их положения в пространстве в один и тот же момент времени будут иметь форму волны (на рис. 177 показаны последовательные стадии возникновения волны).

Поперечные и продольные волны. Колебания шаров в рассмотренной модели происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

Волна, в которой колебания частиц происходят в направлении, перпендикулярном распространению волны, называется *поперечной*.

При распространении волны вдоль резинового шнура отдельные его участки совершают колебания в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны (см. рис. 174). Следовательно, эта волна поперечная. В поперечной волне различают гребни и впадины, которые вы видите на поверхности воды. Любые волны на поверхности жидкости поперечные.

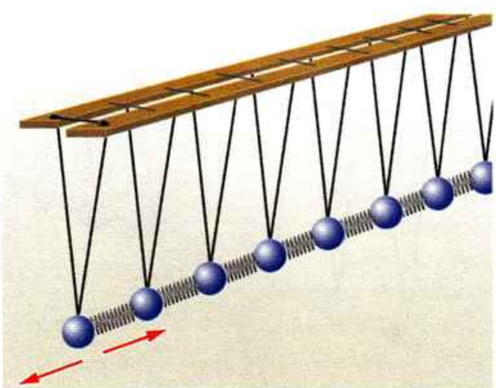


Рис. 178

В опыте с пружиной мы наблюдали, что колебания любого витка пружины происходят в направлении распространения волны (см. рис. 175). Такая волна называется *продольной*.

Механизм возникновения продольной волны можно понять, если воспользоваться той же моделью из шаров, связанных пружинами, но подвесить шары так, чтобы они могли колебаться только вдоль цепочки (рис. 178).

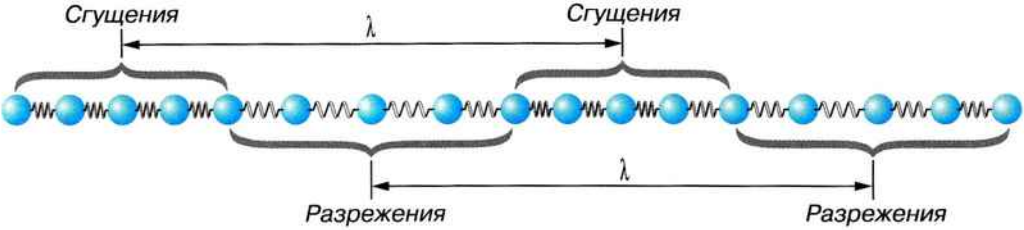


Рис. 179

Если первый шар привести в колебательное движение, то через некоторое время вдоль цепочки распространится волна, представляющая собой чередующиеся уплотнения (сгущения) и разрежения шаров с пружинами (рис. 179, нити на рисунке не показаны).*

Используя одномерные и двумерные модели различных связанных между собой систем, в которых последовательно распространяются колебательные движения, мы старались объяснить процесс распространения возмущений в реальных упругих средах. *Упругая среда* — это твердые, жидкие и газообразные тела, состоящие из взаимодействующих между собой частиц. Шарики и связывающие их пружинки, использованные в наших моделях, давали наглядное модельное представление об инерционных и упругих свойствах частиц — небольших участков реальных сред.

Механические волны, бегущие в упругих средах, называются *упругими волнами*. Таким образом, упругие волны — это процесс передачи возмущений в упругих средах. Вынужденные колебательные движения, возникающие во вновь возмущаемых участках среды, происходят с той же частотой, что и колебания предыдущих участков, т. е. по всей волне колебания совершаются с одной и той же частотой. Вне среды упругие волны существовать не могут.

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются звуковыми волнами, или просто звуком. С некоторыми свойствами звуковых волн вы познакомились в 7-м классе.

В воздухе могут распространяться не только звуковые, но и разрушительные ударные волны от разрывов снарядов и бомб. Сейсмические станции записывают колебания почвы, вызванные землетрясениями, происходящими за тысячи километров. Это возможно только потому, что от источника землетрясения, расположенного, как правило, на глубине от 1 до 30 км, распространяются сейсмические волны — колебания в земной коре. На тысячи километров могут распространяться упругие волны и под водой. При атомном подводном взрыве на тихоокеанском коралловом атолле Бикини в 1947 году звук, распространявшийся под водой, был зарегистрирован на Бермудских островах в Атлантическом океане, находящихся на расстоянии 20 тыс. км. Это расстояние звук прошел за 4 ч.

Без среды звуковые волны, как и любые упругие волны, не распространяются, так что взрыв на Луне, каким бы сильным он ни был, на Земле услышан быть не может.

Проверьте себя

1. Что такое волна?
2. Происходит ли в волне перенос вещества?
3. Какие волны называются поперечными? продольными?
4. Какая среда называется упругой? Приведите примеры упругих сред.
5. Какие волны называются упругими волнами?
6. Могут ли упругие волны распространяться в пустоте?

§ 47. Свойства механических (упругих) волн

Энергия волны. Камень, брошенный в небольшое озеро, приводит в волнообразное движение поверхность воды, и энергия движущейся воды является частью энергии камня. Точно так же передается энергия звуковым волнам, возбуждаемым колеблющимся корпусом гитары, а волнам, бегущим по висящему резиновому шнуру, энергию передает рука, перемещающая начало шнура.

Приведение в движение или деформация все новых и новых участков среды в процессе распространения волны также связаны с передачей энергии от уже колеблющейся частицы к еще покоящейся или от деформированного участка среды недеформированному. О процессе передачи волнового движения говорят как о переносе волной энергии. Энергия, переносимая волной, равна сумме кинетической энергии колеблющихся участков среды и потенциальной энергии их упругой деформации.

Подчеркнем еще раз, что сами участки среды при этом не движутся вместе с волной. В целом они остаются на месте и только колеблются около своих положений равновесия.

Скорость распространения волны. Волна — это распространение возмущений среды в пространстве. Поэтому под скоростью волны понимают скорость распространения возмущения.

Упругие продольные волны могут распространяться во всех средах (твердых, жидких, газообразных), а поперечные — только в твердых.

Скорость волны зависит от свойств среды, в которой эта волна распространяется. В твердых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных. Это обстоятельство используется, например, для определения местоположения очагов землетрясения. При землетрясении образуются волны обоих типов, поэтому, зная скорость продольных и поперечных волн в земной коре и время запаздывания поперечной волны, можно определить расстояние до эпицентра землетрясения.

Длина волны. В опытах и с помощью моделей волны мы выяснили, что в любой механической волне существует два вида движения: колебания частиц (участков) среды и распространение возмущений среды.

Частица совершает одно полное колебание за время, называемое *периодом*. За это время волна распространится в пространстве на определенное расстояние.

Длиной волны называют расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний ее источника.

Обозначим длину волны греческой буквой λ (лямбда). Так как скорость волны — величина постоянная, то пройденное волной расстояние равно произведению скорости на время ее распространения. Таким образом,

$$\boxed{\lambda = vT.}$$

Длина волны совпадает с расстоянием между двумя ближайшими гребнями (или впадинами) поперечной волны (рис. 180) или между двумя соседними сгущениями (разрежениями) продольной волны (см. рис. 179).

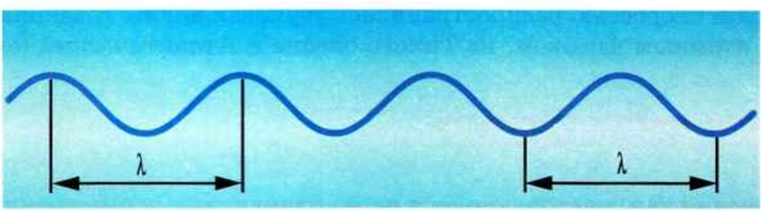


Рис. 180

Таким образом, волна обладает периодичностью как во времени (периодом T), так и в пространстве (длиной волны λ).

Так как частота $\nu = \frac{1}{T}$, то $\lambda = v\frac{1}{\nu}$ и, следовательно,

$$\boxed{v = \nu\lambda.}$$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пока рыба не клевала, рыболов заметил, что за 10 с его поплавок поднимался на гребни бегущих к берегу волн 20 раз. Расстояние между гребнями он оценил в 1,5 м. Чему равна скорость волн?

Решение: Частота колебаний поплавка, а, значит, и участков воды

$$\nu = \frac{N}{t},\ \nu = \frac{20}{10\ \text{с}} = 2\ \text{Гц}.$$

Расстояние между гребнями волны равно длине волны: $\lambda = 1{,}5$ м. Поэтому скорость волны

$$v = \nu\lambda,\ v = 2\ \frac{1}{\text{с}} \cdot 1{,}5\ \text{м} = 3\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: скорость распространения волн равна 3 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Проверьте себя

1. Что понимается под возмущением упругой среды?
2. Что понимается под переносом волной энергии?
3. В каких средах могут возникать и распространяться поперечные волны? продольные?
4. Что такое длина волны?
5. Расстояние между соседними гребнями волны 8 м. Чему равен период колебаний в этой волне, если скорость ее распространения равна 4 м/с?
6. С какой скоростью распространялась звуковая волна, созданная подводным атомным взрывом, из Тихого океана в Атлантический (см. § 46)?

САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 10

1. Движения тел, повторяющиеся через одинаковые промежутки времени, называют механическими колебаниями.
2. Колебания, которые возникают после того, как система была выведена из состояния равновесия и предоставлена самой себе, называют свободными, а колебания, происходящие под действием внешней периодической силы, — вынужденными.
3. Колебания характеризуют амплитудой, периодом и частотой. У свободных колебаний частота определяется собственными свойствами самой колебательной системы, а у вынужденных — частотой изменения внешней силы.

4. Свободные колебания с течением времени затухают. Вынужденные колебания являются незатухающими.
5. При равенстве частоты вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы происходит резонанс — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний.
6. Волна — это процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени. Чтобы механическая волна могла распространяться, среда должна быть упругой.
7. Волны бывают продольные и поперечные. Упругие продольные волны могут распространяться во всех средах, упругие поперечные — только в твердых.
8. Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний в ней, называется длиной волны:

$$\lambda = \upsilon T = \frac{\upsilon}{\nu}.$$

Частота колебаний в волне определяется частотой колебаний источника волны и от свойств среды не зависит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вы познакомились с одной из важнейших физических наук, называемой классической механикой, или механикой Ньютона. Особое место механики в физике обусловлено следующими главными причинами:

во-первых, на ранней стадии познания человеком окружающего его мира изучение механических явлений было особенно необходимо. Знание механики требовалось для строительства жилищ, изготовления орудий труда и т. п. Поэтому на первых порах механика составляла основное содержание физики;

во-вторых, все вновь возникающие разделы физики строились на базе механики, использовали методы и понятия, первоначально в ней разработанные. Можно утверждать, что механика служит фундаментом, на котором воздвигнуто все здание современной физики.

Механика сегодня — научная основа космонавтики, авиации, надводного и подводного транспорта, машиностроения, строительной, оборонной и медицинской техники. Практически нет сейчас ни одного производства, для которого в той или иной мере не были бы нужны знания механики.

Законы классической механики были установлены для тел, которые нас окружают в повседневной жизни, т. е. для тел, состоящих из громадного числа молекул и атомов. Для движений внутриатомных частиц справедливы законы другой науки, называемой квантовой механикой.

Законы механики Ньютона были установлены для сравнительно небольших скоростей, с которыми тела могут двигаться в земных и космических условиях. Эти скорости значительно меньше скорости света. Когда тела движутся со скоростями, сравнимыми со скоростью света, законами классической механики пользоваться нельзя. Такие движения описываются теорией относительности, создателем которой является Альберт Эйнштейн.

Окружающие нас тела достаточно велики и движутся сравнительно медленно, поэтому их движения подчиняются законам Ньютона. Таким образом, область применения классической механики очень обширна. И в этой области человечество всегда будет пользоваться для описания движения тел законами Ньютона.

Эйнштейн следующим образом оценил значение классической механики Ньютона: «Пусть никто не думает, что великое создание Ньютона может быть ниспровергнуто теорией относительности или какой-нибудь другой теорией. Ясные и широкие идеи Ньютона навечно сохранят значение фундамента, на котором построены наши современные физические представления».

Этими словами ученого мы и закончим курс, в котором изложены основы классической механики.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1
Физика как наука

Что такое научные знания. В самом начале 7-го класса, только приступая к изучению физики, вы познакомились с основными этапами изучения физических явлений; с теми этапами, которым следуют физики, стараясь понять и ответить на вопросы, как и почему явления происходят. Вот эти этапы: наблюдение явления $\Rightarrow$ воспроизведение явления в лаборатории $\Rightarrow$ выдвижение гипотезы (предположения) для объяснения явления $\Rightarrow$ опытная проверка правильности найденного объяснения.

С тех пор вы получили первоначальные сведения о свете, звуке, строении вещества, познакомились с тепловыми и механическими явлениями, в вашем словаре появились такие научные термины, как физическая величина, физическая модель, физический закон, физическая теория и другие. Между тем специально мы нигде не раскрывали содержание этих терминов, не обсуждали их роль в построении системы научных знаний об окружающем нас мире, не пытались порассуждать об отличии научных знаний о мире от обычных, бытовых представлений о нем.

Чтобы сразу стала понятной суть проблемы, попытайтесь ответить на вопрос: почему человечество верит в существование атомов и не верит в существование, например, кикимор, хотя ни те, ни другие не видны невооруженным глазом?

По-видимому, потому, что наши знания об атомах не случайны. Гипотеза о существовании атомов подтверждается многочисленными данными наблюдений и опытов. Именно такие знания называются научными. Чем же отличаются научные знания о мире? Какие требования к ним предъявляют? Очевидно, они должны быть истинными, невымышленными, доказуемыми. Эти знания должны быть такими, чтобы *любой желающий* мог убедиться в их справедливости.

Что же касается ученых, то они действуют, познавая окружающий мир тем же способом, что и все люди, т. е. способом проб и ошибок, только доводят этот способ до высокой степени совершенства, подвергая результаты познания внимательному анализу и тщательно планируя свои действия.

Модели тел и явлений. В физике истина добывается из наблюдений, а как подсказывает ваш жизненный опыт, окружающий мир необыкновенно сложен. Механические, тепловые и электромагнитные свойства выступают в каждом, даже самом простом явлении одновременно и взаимосвязанно. Поэтому изучить любое реальное явление полностью, во всем

Рис. 181

разнообразии его внутренних и внешних связей практически невозможно. Даже решение самой, казалось бы, простой практической задачи может оказаться далеко не простым делом.

Рассмотрим, например, автомобиль, движущийся по лесной дороге (рис. 181). По ходу движения шофер то и дело поворачивает руль, работает двигатель автомобиля, т. е. открываются и закрываются клапаны, в цилиндрах перемещаются поршни и вращается коленчатый вал; автомобиль потряхивает на неровностях дороги, и он совершает колебания на рессорах. В процессе работы двигатель нагревается и нагревает корпус автомобиля и окружающий воздух. Для предотвращения перегрева внутри двигателя и в радиаторе циркулирует охлаждающая жидкость, которая также нагревается и нагревает воздух. В карбюратор автомобиля периодически впрыскивается бензин, который смешивается с воздухом, и получившаяся смесь то и дело вспыхивает в цилиндре от искорки свечи, а из выхлопной трубы вырываются отработанные газы.

Движению препятствует воздух, обтекающий автомобиль потоками, и вихри этих потоков вздымают пыль и колышут ветви деревьев. Работающий двигатель вращает электрический генератор автомобиля, и по его электрической цепи течет ток, заставляя вспыхивать свечи, а если автомобиль едет ночью, то фарами освещаются придорожные предметы.

Конечно, здесь упомянуты не все процессы, сопровождающие движение автомобиля. Число этих процессов значительно возрастет, если поднимется ветер и пойдет дождь, или если дорога ухабиста, и водителю часто приходится нажимать на педали газа и тормоза, пользоваться ручкой переключения передач. Между тем, несмотря на многочисленность процессов и сложность происходящего, движение автомобиля можно математически описать, пользуясь законами классической механики. Однако для этого нужно сразу же сделать целый ряд предположений и допущений, упрощающих описание движения и облегчающих применение законов механики. Например, можно попробовать не принимать в расчет нагревание мотора или заведомо неравномерный характер движения, связанный с прерывистыми вспышками горючей смеси.

Для начала стоит рассмотреть движение по сухой ровной и прямой дороге и не учитывать сопротивление воздуха и расход топлива на горение фар. Можно также не учитывать влияние зарослей на обочинах дороги.

Картина явления, учитывающая его основные черты и особенности и освобожденная от деталей, не существенных для поставленной задачи, называется ***физической моделью*** *явления.*

Теоретическое описание любого, даже кажущегося самым простым, физического явления невозможно без предварительного создания его модели.

Правильно ли выбрана модель, т. е. насколько правомерны сделанные упрощения и учтены ли главные особенности происходящего? Ответ в первую очередь зависит от того, что именно нас интересует. Собственно с постановки задачи и формулировки вопроса и нужно начинать создание модели. Например, если мы хотим определить расход энергии, необходимой для горения лампы в фаре автомобиля, совершенно несущественно, движется ли он ночью по лесной дороге или стоит на месте в гараже. Более того, при решении этой задачи можно забыть о законах механики.

Другой будет физическая модель того же автомобиля при ответе на вопрос, как колеблется его корпус при тряске на ухабах. Если же нас интересует время нахождения автомобиля в пути, то, скорее всего, сделанные выше допущения не только правомерны, но и недостаточны, и упрощение модели явления можно продолжить.

Физические модели могут отличаться от моделируемых объектов размерами, типом материала или другими характеристиками. Ясно, что в зависимости от решаемой задачи одно и то же тело или явление может иметь несколько моделей.

Примерами уже известных вам моделей являются материальная точка, равномерное прямолинейное движение (ведь реально такого движения не бывает), равноускоренное движение, модель строения газообразных, жидких и твердых тел, тонкая линза, модель атома или молекулы и другие.

Известный российский физик Я. Френкель, поясняя понятие модели в физике, сравнил ее с карикатурой. Сколько можно создать карикатур одного и того же человека? На каждой из них человек должен быть легко узнаваем, хотя в одном случае у него будут коротенькие ножки и огромная голова, на другой голова будет крошечной, и все внимание карикатурист уделит изображению мундира, на третьей тот же человек будет изображен ребенком, на четвертой буквально одной линией будет намечен профиль лица и т. д. В карикатуре на всеобщее обозрение ярко выставляется одна или несколько хорошо всем знакомых характерных черт, представляющих интерес в той или другой ситуации (рис. 182).

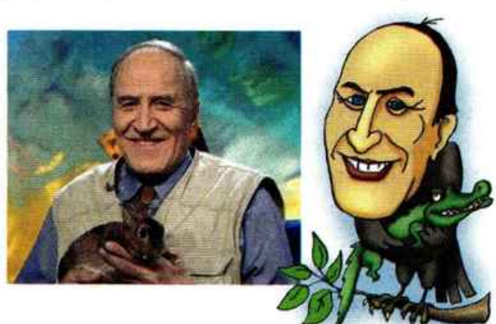


Рис. 182

Так же обстоит дело и с физическими моделями. Чисто внешне с самим физическим явлением или телом его модель может не иметь ничего общего и в то же время с ее помощью можно достаточно точно описать интересующие нас особенности явления, свойства и поведение тела. Никаких правил построения модели не существует, это дело творческое, в каждой задаче индивидуальное.

Создавая модель, нужно опираться на условие задачи, а дальше опыт, здравый смысл и результаты расчетов с использованием созданной модели подскажут, правдоподобны ли полученные при ее использовании результаты, чем нужно еще пренебречь или что дополнительно учесть, чтобы точнее решить задачу. Например, в случае автомобиля этими моделями могут быть и материальная точка, равномерно или неравномерно движущаяся из одного пункта в другой; и электрическая цепь, включающая в себя аккумулятор, предохранители, провода, выключатели, электрические лампочки; и трубы с циркулирующей по ним жидкостью для охлаждения мотора и т. д.

Построить модель трудно. Пренебрегая теми или иными деталями, можно упустить что-то существенное, важное для данного явления, и тогда модель окажется неверной. Особенно трудно построить модель того, что нельзя увидеть непосредственно, скажем, модель атома, молекулы или удаленного от нас звездного скопления. С другой стороны, как заметил американский физик, лауреат Нобелевской премии Ф. Андерсон, «очень часто упрощенная модель проливает больше света на то, как в действительности устроена природа явления, чем любое число вычислений».

Использование моделирования в физике столь распространено, что известную вам последовательность изучения физических явлений можно и нужно дополнить введением этого понятия.

Словарь физики. Физика является основой научного описания явлений природы. Хотя физика зародилась в Древней Греции, в современном смысле слова она начала формироваться только с конца XVI в., когда Г. Галилей впервые стал систематически использовать научный метод изучения природы. Постепенно из частного дела мыслителей-одиночек наука превратилась в огромную область деятельности многих людей. При этом, естественно, развивался и язык научного общения. Как и обычный разговорный, научный язык также содержит много понятий, причем эти понятия всеми учеными трактуются одинаково. Рассмотрим некоторые из них.

Физической величиной называют понятие, отражающее какое-то свойство тел и явлений и выражаемое числом в процессе измерения.

Физический опыт, эксперимент — наблюдение физического явления и измерение характеризующих его физических величин. Результаты измерений называют *экспериментальными данными*. Опыты и эксперименты проводятся для выявления особенностей явлений и процессов, сопоставления экспериментальных результатов с существующими моделями явлений, выдвижения новых моделей, проверки истинности теоретических выводов.

При наблюдении человек изучает *естественный ход* процесса, не вмешиваясь и тем самым не искажая его. Иногда при наблюдении приходится использовать искусственное освещение (например, ультрафиолетовое или импульсное) или другие воздействия на объект. Однако их выбирают такими, чтобы они не нарушали естественный ход процесса и лишь меняли условия наблюдения.

При эксперименте же объект подвергают специально спланированным воздействиям и изучают реакцию объекта на них. Большинство лабораторных работ, которые вы делаете на уроках физики, являются экспериментами.

Классический пример эксперимента — опыты Г. Галилея по сравнению времени падения пушечных ядер с верхнего яруса Пизанской колокольни (см. § 1). Вопреки мнению ученых того времени эксперименты показали, что как легкие, так и тяжелые ядра достигали поверхности Земли за одно и то же время. Эти результаты позволили Галилею опровергнуть теорию Аристотеля о зависимости времени падения от массы тела, считавшуюся незыблемой в течение почти двух тысячелетий.

Физический закон — количественное соотношение между значениями физических величин, характеризующих данное явление, устанавливаемое на основе обобщения экспериментальных данных.

Наиболее общие законы называют *фундаментальными*. Примерами фундаментальных законов являются известные вам закон всемирного тяготения и закон сохранения энергии. Менее общим физическим законом является закон Архимеда.

У каждого закона существует так называемая область применимости — перечень условий или область значений физических величин, в которой закон или следствия из него проверены экспериментально и при этом не обнаружены отклонения от формулировки закона вовсе или они пренебрежимо малы. Чем шире экспериментальная база данных, обобщаемая при выводе закона, тем более общим является закон, и тем шире область его применимости.

Физическая гипотеза — предположение, обобщающее данные экспериментов и повседневного опыта. Исключительно важной для физики и химии была атомно-молекулярная гипотеза, окончательное принятие которой произошло совсем недавно — только в начале XX в.

По мере расширения экспериментальных подтверждений выдвинутой гипотезы она постепенно превращается в теорию или отвергается.

Физическая теория — математические соотношения между физическими величинами, установленные для описания физической модели явления.

Обратите внимание, что физическая теория описывает не само явление, а его модель и только модель, поскольку ни одна теория не в состоянии описать даже самое простое явление с исчерпывающей полнотой. Поскольку моделей одного и того же явления может быть много, то много может быть и различных теорий этого явления.

Рассмотрим, например, падение водяной капли в воздухе. Если для описания падения использовать модель равноускоренного движения, то теоретическая связь между скоростью капли v и временем t ее падения выглядит так:

$$v = gt,$$

где $g \approx 9{,}8$ м/с^2 — ускорение движения капли, считающееся постоянным.

Первое время скорость капли действительно будет возрастать равномерно, и приведенная формула будет соответствовать результатам измерений. Однако по мере роста скорости капли будет возрастать сила ее трения о воздух, поэтому ускорение капли будет уменьшаться, и выбранная модель движения (а с ней и формула для расчета скорости) будет становиться все менее и менее пригодной. Начиная с определенного момента, скорость капли вообще не будет меняться, как, например, не меняется скорость падения дождевых капель.

Если нам нужно с самого начала учесть взаимодействие капли с воздухом, для описания явления ее падения нужно использовать другую модель. Иной станет и теория, описывающая движение капли. Если новая модель будет выбрана удачно, то соответствующая ей теория полнее опишет особенности падения.

С учетом сказанного мы можем уточнить схему получения научных знаний: наблюдение явления $\Rightarrow$ воспроизведение явления в лаборатории $\Rightarrow$ выдвижение гипотезы (предположения) для объяснения явления $\Rightarrow$ создание модели и теории явления $\Rightarrow$ опытная проверка правильности найденного объяснения.

Проверьте себя

1. Что называется физической моделью явления?
2. Перечислите известные вам физические модели.
3. Может ли у явления быть несколько моделей?
4. Чем надо руководствоваться, выбирая ту или иную модель?
5. Приведите примеры явлений и соответствующие им различные модели.
6. Что является критерием правильности выбранной модели?

7. Какое слово в определении равноускоренного движения делает это движение именно моделью, а не реальным движением?
*8. Маленький мячик падает на землю с большой высоты. Можно ли для вычисления времени падения считать мячик материальной точкой, если необходимо учесть сопротивление воздуха?
9. Какие знания называются научными?
10. Для чего проводятся физические опыты и эксперименты?
11. Почему человечество верит в существование атомов и не верит в существование кикимор?
12. Что такое физический закон?
13. Почему у каждого закона существует определенная область применимости?
14. Что такое физическая теория и чем она отличается от физической гипотезы?
15. Что описывает физическая теория?
16. При каких условиях справедлив закон сохранения импульса?

Приложение 2

Учет погрешностей измерений в лабораторных работах. Запись результатов измерений

Физика — опытная наука. Всякий закон, устанавливающий количественную связь между физическими величинами, выводится в результате опытов, основой которых служат измерения. Более того, верным этот закон может считаться лишь с той точностью, с какой выполнены эти измерения. Очень часто именно повышение точности измерений позволяет вскрыть новые, неизвестные ранее закономерности.

При изучении физики в школе вы также сталкиваетесь с необходимостью проводить измерения в ходе практических работ. В 7-м классе вы узнали, как правильно снимать показания приборов. Теперь познакомимся с правилами, определяющими точность результатов измерений.

Напомним, что *измерением* физической величины называют нахождение ее значения с помощью средств измерений. В результате измерения мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за эталон.

Например, за эталон длины принят метр, и в результате измерения длины некоторого отрезка мы узнаем, сколько метров или долей метра укладывается на протяжении этого отрезка. Точно так же при измерении массы тела мы устанавливаем, во сколько раз его масса превосходит массу эталонного образца в один килограмм.

Разумеется, сравнением измеряемых величин с основными эталонами практически никогда не пользуются. Вместо этого используют измерительные приборы, которые тем или иным способом сверены с эталонами. Этими приборами могут быть различного рода линейки, измерительные ленты (при измерениях длины), часы (при измерениях времени), весы и гири (при измерениях массы), электроизмерительные приборы.

Никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Нужный результат мы всегда получаем с некоторой ошибкой. Главная причина ошибок — несовершенство конструкций приборов. Между деталями приборов существует трение, не совсем точна шкала, на показание приборов оказывают влияние влажность, температура, пыль. Поэтому ошибки возникают, например, при сравнении наших измерительных инструментов и приборов с эталонами (так называемые *инструментальные погрешности*). Ясно, что, мы не можем сделать ошибки измерений меньше той, которая определяется инструментальной погрешностью используемого прибора. Чтобы уменьшить такую ошибку, нужно взять другой, более точный и совершенный прибор.

В этом классе мы будем разбираться с ошибками *прямых измерений*, т. е. измерений непосредственно по шкале измерительного прибора.

Напомним, что деления на любой шкале отделены друг от друга штрихами. Крупные штрихи обозначены цифрами — значениями физической величины, измеряемой прибором. Цена деления показывает, насколько изменяется измеряемая величина при перемещении указателя прибора на самое маленькое деление шкалы (от одного штриха до другого).

Чтобы определить цену деления, нужно выбрать два любых ближайших штриха, около которых стоят значения физической величины, вычесть из большего значения меньшее и поделить полученную разность на число делений между выбранными штрихами. Цена деления обозначается латинской буквой C и выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Например, цена деления линейки (рис. 183) составляет

$$C_{\text{лин}} = \frac{4\ \text{см} - 2\ \text{см}}{5} = 0{,}4\ \text{см}.$$

С учетом цены деления можно определить длину бруска (см. рис. 183). Она равна $l \approx 6\ \text{см} + 2 \cdot 0{,}4\ \text{см} = 6{,}8\ \text{см}$.

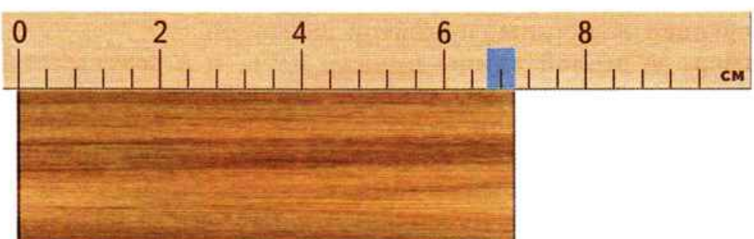


Рис. 183

Показание линейки мы отнесли к ближайшему (левому от конца предмета) штриху шкалы. Неточно? Конечно. Но даже, если бы конец предмета совпал со штрихом шкалы, показание линейки все равно было бы неточным! Ведь, как вы уже знаете, линеек с абсолютно точными шкалами не существует.

*Для количественной оценки качества измерения вводят понятия абсолютной и относительной погрешности измерений.

Познакомимся с понятием абсолютной погрешности измерения. Обозначим истинное значение измеряемой величины буквой X. Заранее оно неизвестно, и для суждения о нем имеется лишь неточное значение $X_{\text{пр}}$ этой величины, измеренное прибором. Если бы все измерения были абсолютно точными, значение X совпало бы со значением $X_{\text{пр}}$. Ошибки измерений приводят к расхождению между X и $X_{\text{пр}}$.

Абсолютной погрешностью или просто *погрешностью* измерения величины X называют величину $|X - X_{\text{пр}}|$. Ее обозначают Δx и выражают в тех же единицах, что и саму величину X.

Если известна абсолютная погрешность, то результат измерения записывают так:

$$\boxed{X = X_{\text{пр}} \pm \Delta x.} \tag{1}$$

Эта запись означает, что истинное значение измеряемой величины лежит где-то между $X_{\text{пр}} - \Delta x$ и $X_{\text{пр}} + \Delta x$; $X_{\text{пр}} - \Delta x \leqslant X \leqslant X_{\text{пр}} + \Delta x$ (рис. 184).

Вычисление погрешностей измерений, т. е. нахождение Δx — сложный процесс. Мы будем использовать следующее правило: *погрешность измерения физической величины X составляет не меньше половины цены деления прибора* $\left(\Delta x \geqslant \frac{C}{2}\right)$.

Например, поскольку цена деления линейки на рисунке 183 равна $C_{\text{лин}} = 0{,}4$ см, то погрешность измерения длины l этой линейкой составляет $\Delta l \geqslant \frac{C_{\text{лин}}}{2} = 0{,}2$ см. Результат измерения длины бруска, изображенного на рисунке 183, записывают в виде:

$$l = (6{,}8 \pm 0{,}2) \text{ см}. \tag{2}$$

Это означает, что истинная длина бруска (ее мы так и не узнали) заключена в интервале

$$6{,}6 \text{ см} \leqslant l \leqslant 7{,}0 \text{ см},$$

который на рисунке 183 выделен цветным прямоугольником. Видно,

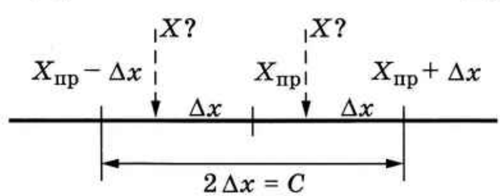


Рис. 184

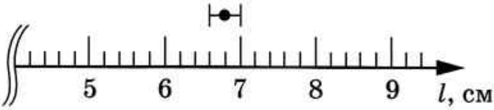


Рис. 185

что, как и должно быть, правый конец бруска в прямоугольник попадает. Про длину бруска говорят в данном случае, что она равна 6,8 см с погрешностью 0,2 см.

Чтобы уточнить значение длины бруска, надо воспользоваться линейкой с меньшей ценой деления.

Существует способ графического изображения данных измерений вместе с их погрешностями. На рисунке 185 показано, как выглядит изображение результата измерения длины бруска, представленного выражением (2). Точкой обозначена величина $l \approx 6{,}8$ см, а горизонтальный отрезок, отложенный влево и вправо от этой точки в выбранном на оси l масштабе, изображает погрешность измерения линейкой, которую мы вычислили (0,2 см).

Если при проведении лабораторной работы вам требуется записать результат проделанных прямых измерений, то в соответствующую таблицу этот результат следует вносить в виде правой части формулы (1).

Например, если при измерениях веса тела использовался лабораторный динамометр с ценой деления 0,2 Н, а значение веса оказалось равным 3,2 Н, то запись в таблице должна иметь вид:

$$(3{,}2 \pm 0{,}1)\ \text{Н}.$$

В тех случаях, когда измеряемой величиной является масса тела, определяемая путем его взвешивания на рычажных весах, абсолютную погрешность измерений следует считать равной половине массы наименьшей из использованных гирь. Например, если масса ластика оказалась равной 29,7 г и при этом на правую чашку весов были поставлены гири достоинством 20 г, 5 г, 2 г, 2 г, 500 мг и 200 мг, то результат взвешивания записывается в виде:

$$(29{,}7 \pm 0{,}1)\ \text{г}.^*$$

Проверьте себя

1. Перечислите измерения, с которыми вы сталкиваетесь в жизни.
2. Что измеряют врачи? продавцы? портные? спортивные судьи? Какими измерительными приборами они при этом пользуются?
3. Что называют измерением физической величины?
4. Почему никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно?
5. С чем связаны ошибки, возникающие при использовании измерительных приборов? Как можно убедиться в существовании таких ошибок?

6. Что называется абсолютной погрешностью измерения?
7. Чтобы найти абсолютную погрешность измерения, нужно вычислить модуль разности величин X и $X_{\text{пр}}$. Казалось бы, просто. Почему же процесс нахождения Δx назван сложным?
8. Чему равна погрешность измерения длины с помощью линейки с миллиметровыми делениями?
9. Найдите цену деления домашнего медицинского термометра, измерьте свою температуру и запишите результат измерения с учетом его погрешности.
10. Запишите длину карандаша, показанного на рисунке 186, с учетом абсолютной погрешности измерений.

Рис. 186

11. Линейкой с миллиметровыми делениями измерьте длину и ширину страницы этого учебника физики и запишите результаты с учетом погрешности измерения.

Приложение 3

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Измерение ускорения тела при равноускоренном движении

Оборудование: желоб лабораторный металлический длиной 1,4 м; шарик металлический диаметром 1,5 — 2 см; цилиндр металлический; метроном (один на весь класс) или секундомер; лента измерительная; кусок мела.

Указания к выполнению работы

Шарик скатывается по прямолинейному наклонному желобу равноускоренно. Если ось OX направить по направлению движения, то все три вектора — вектор перемещения $\vec{s}$, вектор ускорения $\vec{a}$ и вектор скорости $\vec{v}$ — будут сонаправлены, поэтому уравнение движения можно записать в скалярной форме:

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

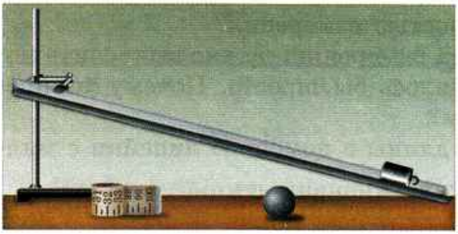


Рис. 187

так как начальная скорость шарика равна нулю.

Отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Промежуток времени измеряется с помощью метронома. Метроном настраивают на 120 ударов в минуту, т. е. промежуток времени между двумя следующими друг за другом ударами равен 0,5 с.

Порядок выполнения работы

1. Сформулируйте цель работы.

2. Соберите установку по рисунку 187. Начальное положение шарика отметьте мелом.

3. Пустив шарик (одновременно с ударом метронома) с верхнего конца желоба, подсчитайте число ударов метронома до столкновения шарика с цилиндром. Предварительно опытным путем подберите положение цилиндра так, чтобы удар шарика о цилиндр совпал с третьим или четвертым ударом метронома (первым считается удар в момент пуска).

4. Вычислите время движения шарика.

5. Измерьте длину перемещения шарика.

6. Не меняя наклона желоба (условия опыта должны оставаться неизменными), повторите опыт 4—5 раз. Результаты измерений занесите в таблицу с учетом их абсолютных погрешностей.

Измеряемая величина	№ опыта				Среднее значение величины
	1	2	3	4	
Время движения, с					
Длина перемещения, м					

7. Используя найденные средние значения времени движения и длины перемещения шарика, вычислите его ускорение.

2. Изучение упругих свойств пружины

Цель работы: выяснить, выполняется ли закон Гука при растяжении пружины.

Оборудование: штатив с лапкой; спиральная пружина или динамометр, шкала которого закрыта бумагой; набор грузов (масса одного груза 100 г); полоска миллиметровой бумаги или линейка с миллиметровыми делениями.

Порядок выполнения работы

1. Укрепите динамометр так, как показано на рисунке 188.

2. На шкале динамометра укрепите миллиметровую бумагу или, что одно и то же, линейку с миллиметровыми делениями.

3. Отметьте начальное положение стрелки динамометра.

4. Подвесьте к пружине динамометра груз известной массы и измерьте вызванное им удлинение пружины x.

5. К первому грузу добавьте второй, третий и т. д., измеряя каждый раз удлинение пружины.

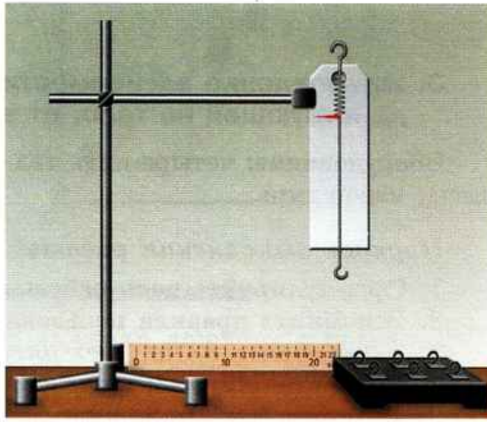


Рис. 188

6. Результаты измерений удлинения занесите в таблицу с учетом их абсолютной погрешности.

№ опыта	$F_т$, Н	x, см
1		
2		
3		

7. По результатам измерений постройте график зависимости модуля силы упругости от удлинения пружины. (Во всех опытах сила тяжести, действующая на соответствующий груз, уравновешивается силой упругости, поэтому $F_{упр} = F_т$.)

Так как неизбежен разброс экспериментальных точек, то график надо проводить так, чтобы примерно одинаковое число точек оказалось по разные стороны от графика. Если у вас получится прямая, проходящая через начало координат, то график свидетельствует о прямо пропорциональной зависимости модуля силы упругости удлинению пружины, что и утверждается законом Гука:

$$F_{упр} = k\,|x|, \text{ где } k \text{ — жесткость пружины.}$$

8. После построения графика возьмите точку на прямой (в правой части графика), определите соответствующие этой точке значения модуля силы упругости и удлинения и вычислите жесткость пружины:

$$k = \frac{F_{упр}}{x}.$$

3. Установление зависимости силы тяжести, действующей на тело, от его массы

Оборудование: четыре-пять тел разной массы; динамометр; рычажные весы; набор гирь.

Порядок выполнения работы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Вспомните правила пользования рычажными весами.
3. Измерьте массу четырех-пяти тел.
4. Измерьте силу тяжести, действующую на эти тела. (Тело не обязательно должно быть монолитным; это может быть и несколько сцепленных между собой грузов.)
5. Результаты измерений с учетом их абсолютных погрешностей занесите в таблицу.

Масса тела, г					
Сила тяжести, Н					

6. По данным таблицы постройте график зависимости модуля силы тяжести $\vec{F_т}$ от массы m тела. Масштаб выберите самостоятельно.

Примечание. При построении графика учтите, что результат измерения — это не точка, а прямоугольник, стороны которого определяются погрешностями измерений силы тяжести и массы тела (рис. 189, *а*). Линия графика проводится так, чтобы, во-первых, она проходила через все прямоугольники, а, во-вторых, число прямоугольников над линией и под ней было примерно одинаково (рис. 189, *б*).

7. Сделайте вывод о виде зависимости между силой тяжести и массой тела.
8. С помощью построенного графика определите значение коэффициента пропорциональности g и выразите его в ньютонах на килограмм. (Воспользуйтесь правой частью графика, соответствующей большим значениям массы.)

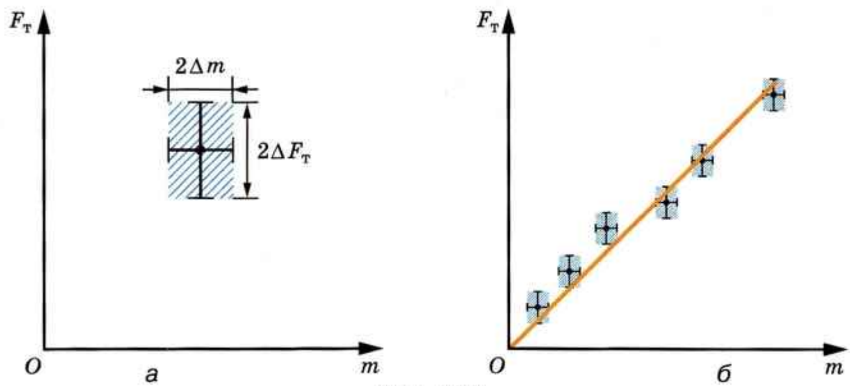


Рис. 189

4. Измерение коэффициента трения скольжения

Оборудование: брусок с крючком; длинная дощечка или линейка; динамометр; три груза массой по 100 г.

Указания к выполнению работы

При равномерном движении бруска сила $\vec{F}$, с которой тянут брусок, равна по модулю силе трения скольжения $\vec{F}_{тр}$, действующей на брусок: $F = F_{тр}$.

Сила нормального давления $\vec{N}$ равна по модулю весу бруска: $N = P$.

Порядок выполнения работы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Соберите установку по рисунку 190.
3. Взвесьте брусок и грузы.
4. С помощью динамометра приведите брусок в равномерное движение по линейке, расположенной горизонтально (см. рис. 190). Заметьте при этом показания динамометра.
5. Положите брусок на широкую грань и, нагружая брусок одним, двумя и тремя грузами, в каждом случае измеряйте силу трения. Результаты измерений с учетом их абсолютных погрешностей занесите в таблицу.

Измеряемая величина	Брусок с одним грузом	Брусок с двумя грузами	Брусок с тремя грузами
Вес бруска с грузами, Н			
Сила трения при скольжении на широкой грани, Н			
Сила трения при скольжении на узкой грани, Н			

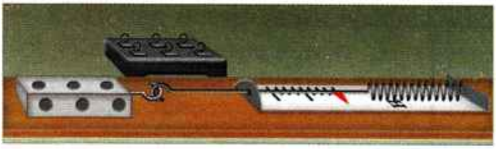


Рис. 190

6. По результатам измерений постройте график зависимости модуля силы трения от модуля силы нормального давления с учетом погрешностей (способ построения приведен в лабораторной работе 2).

7. Выбрав на правой части построенного графика произвольную точку, определите соответствующие ей значения $F_{тр}$ и N, а затем по формуле

$$\mu = \frac{F_{тр}}{N}$$

найдите коэффициент трения скольжения бруска на широкой грани.

*8. Повторите измерения, перечисленные в п. 5 и 6, положив брусок на узкую грань. Результаты измерений с учетом погрешностей измерений также занесите в таблицу.

9. По новым даным постройте второй график зависимости модуля силы трения от модуля силы нормального давления (см. п. 6) и с его помощью определите коэффициент трения скольжения бруска на узкой грани (см. п. 7).

Ответьте на вопрос:

Зависит ли коэффициент трения скольжения от площади опоры тела?*

5. Определение работы сил тяжести, упругости и трения

Оборудование: штатив с лапкой; брусок; измерительная линейка; динамометр; грузы.

Порядок выполнения работы

1. Сформулируйте цель работы.
2. Установите линейку наклонно, положив ее на лапку штатива (рис. 191).
3. Положите брусок на линейку и подберите такой угол наклона, чтобы брусок оставался неподвижным и не соскальзывал с линейки.

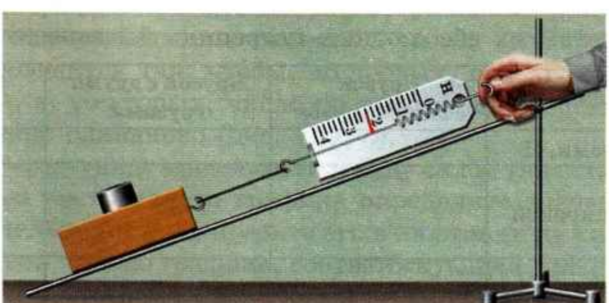


Рис. 191

4. С помощью динамометра втяните брусок с одним грузом вверх по линейке. Динамометр перемещайте равномерно, параллельно линейке.

5. Вычислите:

а) работу силы тяжести, действующей на брусок с грузом;

б) работу силы трения скольжения;

в) работу силы упругости динамометра.

Необходимые для расчетов величины установите самостоятельно и произведите их измерения.

6. Повторите опыты и расчеты, нагружая брусок двумя (или тремя) грузами.

6. Проверка условия равновесия рычага

Оборудование: рычаг на штативе; набор грузов (масса одного груза 100 г); измерительная линейка (рис. 192).

Порядок выполнения работы

1. Сформулируйте цель работы.

2. Вращая гайки на концах рычага, добейтесь, чтобы он расположился горизонтально.

3. Подвесьте два груза на левой части рычага на расстоянии, равном примерно 12 см от оси вращения.

4. Путем проб установите, на каком расстоянии вправо от оси вращения надо подвесить: а) один груз; б) два груза; в) три груза, чтобы рычаг пришел в равновесие.

5. Запишите значения измеренных величин в таблицу.

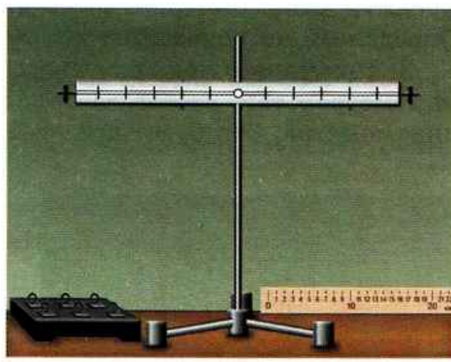


Рис. 192

№ опыта	Левая часть рычага			Правая часть рычага		
	F_1, Н	l_1, Н	M_1, Н · м	F_2, Н	l_2, Н	M_2, Н · м
1						
2						
3						

6. Вычислите моменты, создаваемые силами, действующими на рычаг, в каждом случае.

7. Сравните для каждого случая момент силы, создающей вращение по часовой стрелке, с моментом силы, создающей вращение против часовой стрелки.

8. Если оказалось, что моменты не равны, найдите причину этого. Подумайте над тем, как можно улучшить результат.

7. Измерение выталкивающей (архимедовой) силы

Цель работы: обнаружить на опыте выталкивающее действие жидкости на погруженное в нее тело и научиться измерять выталкивающую силу с помощью динамометра.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой; тело; динамометр; сосуд с водой и сосуд с насыщенным раствором соли в воде; нить.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку по рисунку 193. Для этого в лапке штатива закрепите динамометр. С помощью нити подвесьте тело к динамометру. Определите по показанию динамометра вес тела P_0 в воздухе.

2. Подставьте под груз сосуд с водой и опустите муфту с лапкой и динамометром так, чтобы все тело погрузилось в воду. Запишите показание динамометра. Это будет вес тела в воде (P).

Рис. 193

3. По полученным данным вычислите выталкивающую силу, действующую на тело в воде.

4. Повторите опыт, погрузив тело в воду наполовину. Снова определите выталкивающую силу.

5. Сделайте вывод о зависимости архимедовой силы от объема вытесненной телом жидкости.

6. Вместо чистой воды возьмите насыщенный раствор соли и снова определите выталкивающую силу, действующую на тело при полном его погружении в жидкость.

7. Сделайте вывод о характере зависимости выталкивающей силы от плотности жидкости.

8. Измерение ускорения свободного падения с помощью нитяного маятника

Цель работы: вычислить ускорение свободного падения из формулы для периода колебаний математического маятника:

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

Оборудование: шарик с отверстием или груз с крючком; нить; штатив с муфтой и кольцом; измерительная лента; часы с секундной стрелкой.

Указания к выполнению работы

1. Из формулы периода колебаний математического маятника выразите ускорение свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2}l$$

(здесь l — длина подвеса маятника, T — период его колебаний).

2. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепите при помощи муфты кольцо и подвесьте к нему шарик на нити. Нить должна иметь длину 80—100 см.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину нити от точки подвеса до центра шарика измерительной лентой.

2. Отклоните маятник от положения равновесия на 5—8 см и отпустите его.

3. Измерьте время t сорока полных колебаний.

4. Не изменяя условий опыта, повторите измерение времени t и найдите среднее значение $t_{ср}$.

5. Вычислите среднее значение периода колебаний $T_{ср}$ по среднему значению $t_{ср}$.

6. Вычислите значение $g_{ср}$ по формуле:

$$g_{ср} = \frac{4\pi^2}{T_{ср}^2}l.$$

Ответьте на вопросы:

1. При каких условиях справедлива формула для периода колебаний математического маятника?

2. Можно ли сказать, что из формулы для ускорения свободного падения следует, что g прямо пропорционально длине нити маятника?

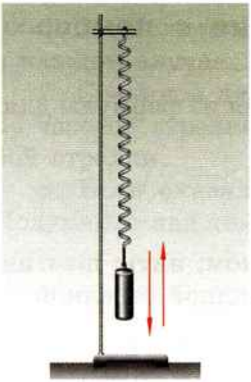


Рис. 194

9. Определение массы с помощью пружинного маятника

Цель работы: вычислить массу тела из формулы для периода колебаний пружинного маятника:

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

Оборудование: штатив с лапкой; пружина; измерительная линейка; груз; динамометр; секундомер.

Указания к выполнению работы

1. Убедитесь, что масса пружины намного меньше массы груза.

2. Конец пружины закрепите в лапке штатива, подвесьте к другому концу груз и проверьте, зависит ли период колебаний груза от амплитуды его колебаний. Результаты измерений, подтверждающие ваш вывод, оформите в виде таблицы.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину нерастянутой и растянутой пружины и вычислите ее жесткость, используя динамометр.

2. Определите период вертикальных колебаний пружинного маятника, измерив время сорока колебаний груза (рис. 194).

3. Вычислите массу груза, используя формулу для периода колебаний пружинного маятника, и сравните ее с массой этого груза, измеренной с помощью динамометра.

Ответьте на вопрос:

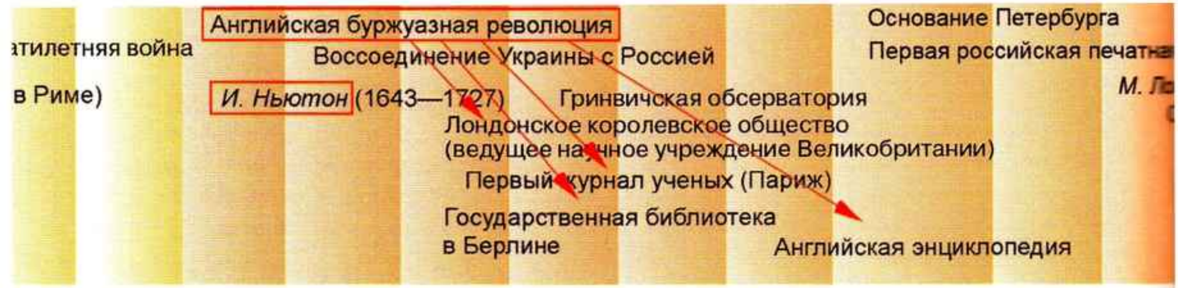
При каких условиях справедлива формула для периода колебаний пружинного маятника?

Приложение 4

Ответы к задачам

§ 5. **4.** Через 20 с. **5.** Не изменится. **§ 7.** **5.** 8,8 м/с. **6.** 3,3 м/с. **§ 9.** **5.** 22 м/с. **§ 10.** **2.** 90 м. **3.** 100 м. **4.** 0,25 м/с^2; 7,5 м/с; 450 м. **6.** 50 м. **§ 11.** **5.** 1 с; 4,9 м; 9,8 м/с. **6.** ≈20 м/с; 60 м. **7.** ≈30 м. **§ 13.** **3.** 0,00002 1/с; 0,0003 1/с. **5.** В 288 раз. **6.** 2,8 м/с^2. **7.** 1 км/с. **§ 16.** **6.** Нет. **7.** 12 кН. **§ 17.** **7.** 13 кН. **§ 18.** **5.** 0,25 м/с^2; 0,2 м/с^2. **6.** Через 11 с. **§ 19.** **4.** $2{,}1 \cdot 10^{20}$ Н. **§ 20.** **9.** 3,9 м/с^2. **§ 21.** **4.** Нет. **§ 23.** **7.** 78 Н. **8.** 25 Н. **§ 25.** **7.** 4 Н. **8.** $2\,mv$. **9.** 56 Н; в 56 раз. **10.** На 10 кг · м/с. **§ 26.** **4.** 6,4 м/с. **5.** 0,1 м/с. **7.** mv; mv; $\frac{v}{2}$. **8.** mv; $\frac{v}{100}$. **9.** Не изменилась. **§ 27.** **9.** 4 кН. **10.** Силы упругости. **§ 29.** **14.** Уменьшится на 125 Дж. **15.** 0,006 Дж. **17.** а) Да; б) нет. **§ 30.** **6.** 294 Дж; 588 Дж. **7.** 392 кДж. **§ 33.** **5.** 78%. **§ 35.** **7.** На 10,3 м. **§ 37.** **7.** Вольтер не учел силу Архимеда, уменьшающую вес пузыря в воздухе ровно на столько, сколько весит воздух в пузыре. **10.** Силы одинаковы. **13.** 735 Н. **14.** 2300 кг/м^3. **16.** Нет. **§ 40.** **6.** 1,6 м/с^2. **§ 42.** **6.** 4 раза. **§ 47.** **5.** 2 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ



На первом форзаце в таблицу включены сведения о крупных событиях, явлениях и людях — современных или близких к эпохе Ньютона, главного «героя» этого учебника.

Еще раз обращаем ваше внимание на то, что и в области человеческого познания, и в жизни общества все взаимосвязано. Таблица предоставляет вам удобообозримый материал для размышлений *о природе и значении* этих связей.

Ньютон отмечал, что своими успехами обязан тому, что «стоял на плечах гигантов». Кто же они?

Приведем несколько примеров (возможных ходов) такой работы с таблицей.

1. Связь прямая и очевидная. (Ньютон дал математический вывод законов Кеплера.)

2. Фрэнсиса Бэкона мы знаем как основоположника опытного познания. Но в какой мере существовало его прямое влияние на ученых XVII—XVIII вв.? Читали ли они — и именно Ньютон — Ф. Бэкона? (Это можно установить, изучив биографии Ньютона и Бэкона.)

3. Знаком ли был Ньютон с творчеством Шекспира? (Во всяком случае в Англии что-то изменилось из-за того, что в ней жил, писал, играл на сцене Шекспир...)

4. Кажется очевидным, что изменения в общественном строе влияют на развитие науки, образования и просвещения. Но происходит ли это сразу и прямо?

5. Видимо, разные науки по-разному зависят от конкретных социально-экономических условий. Нет ли здесь наиболее прочной и активной связи с географическими открытиями?

6. Материал таблицы демонстрирует прямое и решающее влияние экономики на процесс производства новых знаний (технических и технологических).

Но грубым упрощением будет утверждение, что только этим объясняется научно-технический прогресс. Проследим по таблице, как много разных людей и их дел (в политике, общественной жизни, образовании, искусстве, гуманитарном знании) по-своему участвовали в подготовке промышленного переворота.

Пользуясь таблицей, докажите, что прогресс производства, экономики зависит от *опережающего* развития культуры (в том числе науки, искусства, образования и просвещения).

Какие еще связи, значимые для познания исторического процесса, вы можете выявить, используя свой жизненный опыт и ориентируясь на такого рода табличные построения?