
А. В. ПЁРЫШКИН, В. В. КРАУКЛИС

# КУРС ФИЗИКИ

*ЧАСТЬ ПЕРВАЯ*

## МЕХАНИКА

УЧЕБНИК ДЛЯ 8-го КЛАССА
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЁРТОЕ

*Утверждён*
*Министерством просвещения РСФСР*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
Москва — 1957

## ВВЕДЕНИЕ

**1. Материя и движение.** Воздух, вода, земля, небесные тела, растения, животные, т. е. всё, что нас окружает, и, наконец, мы сами—всё это составляет мир, или природу.

В существовании различных тел, а следовательно, и природы в целом мы убеждаемся с помощью наших органов чувств. Так, находясь в классе, мы видим и осязаем парты, столы и стулья, видим и слышим учителя, товарищей и, таким образом, воспринимаем всё нас окружающее.

Всё существующее составляет материальный мир, или материю.

*„Материя есть то, что, действуя на наши органы чувств, производит ощущение“* (Ленин).

Материя существует в различных видах или формах. Одна из форм материи, из которой состоят все окружающие нас тела, называется веществом. Цветок, чернильница или воздух, которым мы дышим,—любые тела состоят из вещества.

С течением времени с телами в природе происходят различные изменения. Примером таких изменений является движение тел относительно друг друга, переход вещества из одного состояния в другое, рост растений и животных, химические превращения вещества и т. д.

Изменения происходят и с небесными телами в целом. Астрономия учит, что с течением времени меняется, например, температура звёзд и Солнца, внутри них происходят сложные процессы превращения одних форм материи в другие. Ещё более сложные изменения происходят в растительном и животном мире. Животные и растения зарождаются, развиваются и умирают. Нет ни одного тела в природе, которое не испытывало бы с течением времени изменений. „Всё течёт, всё изменяется“,—учил ещё в VI в. до нашей эры греческий учёный Гераклит.

Материя постоянно развивается и изменяется, или, как принято говорить, находится в движении, причём под движением надо понимать всякое вообще изменение, а не только перемещение тела из одного места в другое. *Мир—это движущаяся материя.*

Материя всегда существовала и всегда будет существовать, видоизменяясь и развиваясь. Закон неуничтожаемости материи и движения был открыт великим русским учёным Михаилом Васильевичем Ломоносовым.



постепенно возникли науки о природе: физика, химия, астрономия, ботаника, зоология и др.

Изучая явления природы, наука установила, что все они происходят не случайно, а в тесной связи одно с другим—закономерно. Падение тел, например, происходит вследствие притяжения их Землёй, смена времён года на Земле связана с движением Земли вокруг Солнца, движение воздуха—ветер—вызывается неравномерным нагреванием его и т. д.

*Цель наук о природе заключается в том, чтобы открыть, изучить её законы и практически использовать их.*

Законы природы, т. е. взаимные связи различных явлений, совершенно независимы от воли и желаний людей. Как бы нам ни хотелось, например, чтобы скорее наступила весна и было много солнечных дней, весна наступит в строгом соответствии с положением Земли относительно Солнца, а погода будет такой, какую создадут сложившиеся в атмосфере условия.

Однако независимость законов природы от желаний людей вовсе не означает, что люди бессильны перед природой. Наоборот, наука именно для того и нужна обществу, чтобы вооружить его знанием законов природы для использования их в интересах общества.

Весенний разлив рек и связанные с ним наводнения—закономерное явление природы, не зависящее от воли и желаний людей. Однако, умело применяя открытые законы природы, люди научились сооружать плотины, каналы и водохранилища, регулировать огромную силу разливающихся рек и использовать её.

Наука у нас в Советском Союзе поставлена на службу строительству коммунизма. Она помогает переделывать природу в интересах людей.

Вооружившись знаниями, советские рабочие и инженеры с помощью учёных осуществили, например, вековую мечту русского народа: построили канал, соединяющий две могучие реки—Волгу и Дон. На многих реках нашей страны развернулись грандиозные стройки мощных гидроэлектростанций.

Советские учёные стремятся применить каждое новое открытие на пользу людям, на увеличение их жизненных благ, на помощь людям в борьбе с природой. Поэтому в нашей стране наука окружена вниманием и заботой. Ярким выражением этого внимания является недавно построенный дворец науки—величественное здание Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, оснащённое по последнему слову науки и техники (рис. 1).

Московский государственный университет носит имя гениального русского учёного М. В. Ломоносова, который, по выражению А. С. Пушкина, „сам был первым нашим университетом“.

ГЛАВА

# ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

**3. Механическое движение.** Вдали на дороге виден автомобиль. Мы не слышим шума его мотора и не видим, вращаются его колёса или нет. Как определить—движется автомобиль по дороге или нет?

Проследим за положением автомобиля относительно каких-либо неподвижных предметов, находящихся у дороги, например телеграфных столбов или деревьев. Если расстояние автомобиля от этих неподвижных предметов меняется, мы заключаем, что автомобиль движется; если же не меняется, значит автомобиль находится в покое.

Подобным же образом мы определяем, движется или нет поезд, пароход, самолёт—вообще любое тело.

*Изменение положения данного тела относительно других тел называется механическим движением.*

Механические движения тел весьма разнообразны. Движение планет, облаков, воды в реках и океанах, поездов, самолётов, автомобилей, различных частей машин и станков, людей, животных, полёт птиц—всё это лишь немногие примеры механических движений.

Все тела природы, все частицы, из которых состоят эти тела, находятся в движении. На первый взгляд кажется, что это не всегда верно; например, дома стоят неподвижно, неподвижны горы, леса и многие другие предметы. В действительности же все эти предметы неподвижны только относительно друг друга, но они вместе с Землёй совершают суточное вращение и движутся вокруг Солнца.

В природе не существует совершенно неподвижного тела. *Механическое движение совершают все тела природы и частицы, из которых состоят эти тела.*

Механические движения изучаются в разделе физики, называемом механикой. Слово механика произошло от греческого слова „механэ", что значит машина или приспособление.

Машины ещё в глубокой древности применялись в транспорте, а также в строительном и военном деле. На рисунке 2 изображено применение древними египтянами рычагов при постройке пирамид.



Законы механики лежат в основе устройства и сложнейших современных машин. На рисунке 3 изображён современный башенный подъёмный кран, применяющийся на наших стройках. Один такой кран выполняет работу тысячи рабочих.

**4. Относительность движения и покоя.** Движением, как мы видели, называется изменение положения данного тела относительно каких-либо других тел. Пароход, например, движется относительно берега, поезд—относительно полотна железной дороги, резец токарного станка—относительно основания станка

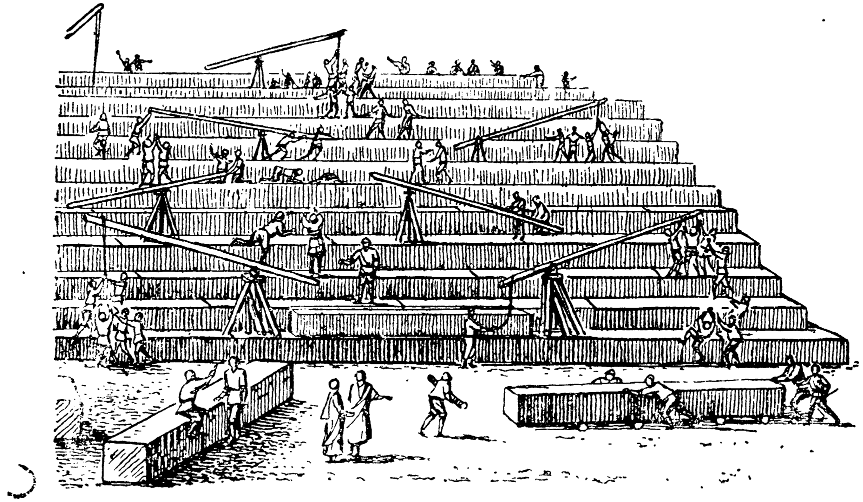


Рис. 2. Применение рычагов при постройке пирамид в древнем Египте.

и т. д. Но и берег, и полотно железной дороги, и основание станка сами находятся в движении вместе с Землёй; мы лишь условно принимаем их за неподвижные тела.

*Движение тела относительно других тел, условно принимаемых за неподвижные, называется относительным движением.*

Так как все тела природы находятся в движении и абсолютно[1] неподвижных тел нет, то не существует и абсолютных движений, точно так же как не существует и абсолютного покоя.

*Всякое движение, так же как и всякий покой, является относительным.*

Одно и то же движение, рассматриваемое относительно разных тел, будет представляться по-разному. Представим себе пассажира, сидящего в вагоне движущегося поезда. Что можно

[1] *Абсолют*—от латинского слова абсолютус—безусловный.

сказать о его движении? Проводник вагона скажет о пассажире, что он неподвижен (сидит), стрелочник, мимо которого движется поезд, уверяет, что пассажир движется мимо него. И в сущности каждый из них прав. Проводник вагона, заявляя о том, что пассажир не движется, рассматривает положение пассажира относительно предметов в вагоне. Стрелочник, стоящий на земле и наблюдающий за движением поезда, рассматривает положение пассажира или относительно полотна дороги, или относительно себя.

Так как два наблюдателя рассматривали положение пассажира относительно разных предметов, то они и пришли к различным выводам.

Рассмотрим другой пример. Пассажир находится в закрытой каюте речного парохода, где он видит только стены каюты и закрытое занавеской окно. Может ли он сказать что-либо определённое о движении парохода? При спокойном ходе парохода, не слыша шума работы машины, невозможно определить, движется пароход или нет. Надо открыть окно, найти какой-либо неподвижный предмет на берегу и только по изменению расстояния от этого предмета можно будет судить о движении парохода.

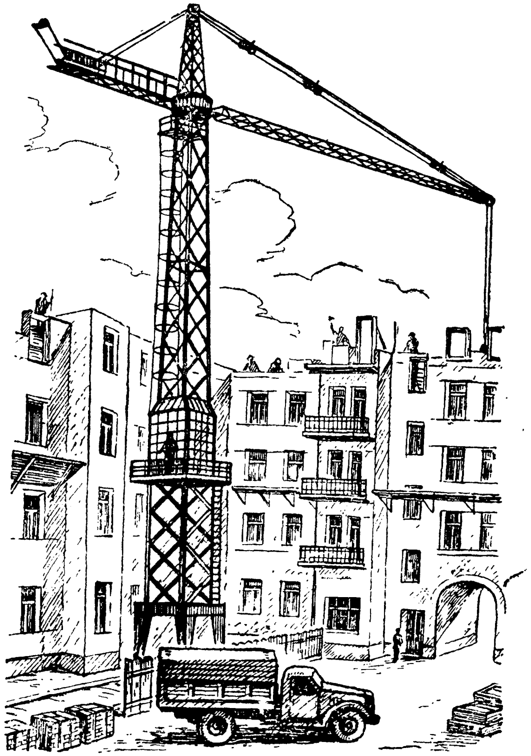


Рис. 3. Башенный кран, применяющийся на стройках.

Таким образом, желая определить, движется тело или нет и как оно движется, мы должны указать, относительно каких тел рассматривается интересующее нас движение.

*Тела, относительно которых рассматривается движение, называются телами отсчёта.*

В дальнейшем ***при изучении различных движений в качестве тела отсчёта мы будем брать Землю или какое-либо другое тело, неподвижное относительно Земли,*** например стол физического кабинета, где производятся опыты.

Вопрос об относительности движения и покоя изучался знаменитым итальянским учёным Галилео Галилеем. Ниже приводится выписка из его книги, впервые опубликованной в 1632 г., в которой он излагает свои взгляды по данному вопросу.

### ИЗ КНИГИ ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЯ „ДИАЛОГ О ДВУХ СИСТЕМАХ МИРА"

„Заключите себя с каким-нибудь приятелем в зале под палубой какого-нибудь большого корабля и пустите туда мух, бабочек и других подобных маленьких летающих животных; пусть там также будет большой сосуд с водой и в нём рыбки; подвесьте там же к потолку кружку, из которой капля за каплей вытекала бы вода в другой сосуд, находящийся внизу под ней. Пока корабль стоит на месте, наблюдайте, как эти летающие животные с равной быстротой будут летать во все стороны комнаты; рыбки будут двигаться, плавая безразлично во все стороны; падающие капли будут попадать все в подставленный сосуд; и вы, бросая приятелю какую-нибудь вещь, не будете принуждены бросать её с большей силой в одну сторону, чем в другую, если только расстояния одинаковы; и, прыгая, вы будете проходить одинаковые расстояния во все стороны. Заметьте как можно тщательнее всё это (хотя нет никакого сомнения, что так и должно быть, пока судно стоит) и заставьте привести в движение корабль с какой угодно быстротой. И вот (если только движение будет равномерное, а неколебательное в ту и другую сторону) вы не заметите и малейшей перемены во всех названных явлениях и ни по одному из них не в состоянии будете судить, движется ли корабль или стоит на месте".

***Упражнение 1.***

1. Почему говорят, что Солнце восходит и заходит? Что в данном случае является телом отсчёта?

2. Два автомобиля движутся по шоссе так, что некоторое время расстояние между ними не меняется. Указать, относительно каких тел каждый из них находится в покое и относительно каких тел они в течение этого промежутка времени движутся.

**5. Движение твёрдого тела и движение точки.** Механические движения тел в природе и технике могут быть весьма разнообразны и сложны.

Наиболее простым видом движения тела является поступательное движение. При поступательном движении любая прямая, проведённая в теле, остаётся параллельной самой себе.

Поступательным движением является, например, движение ящика, выдвигаемого из стола, движение поршня в цилиндре паровой машины или в двигателе внутреннего сгорания, движение вагона на прямолинейном участке железнодорожного пути, движение резца вдоль корпуса токарного станка (рис. 4) или детали на продольно-строгальном станке относительно резца (рис. 5). На рисунке 6 показано поступательное движение карандаша.

При поступательном движении все точки тела проходят одинаковые расстояния и при своём движении описывают одинаковые линии. Поэтому, ***чтобы изучить поступательное движение твёрдого тела, достаточно изучить движение какой-нибудь одной точки тела.***

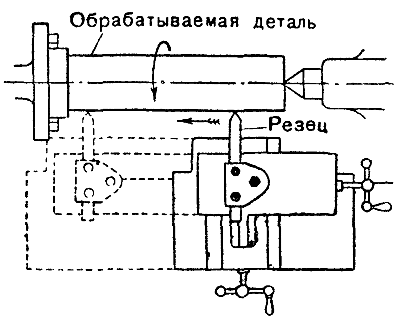



Рис. 4. Поступательное движение резца токарного станка.

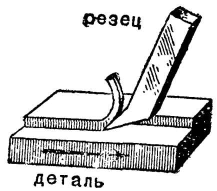



Рис. 5. Поступательное движение детали на продольно-строгальном станке.

В дальнейшем мы часто будем говорить о движении тела, рассматривая его как точку.

Если непрерывно отмечать положение движущегося тела в пространстве точками, например: $A_1$; $A_2$; $A_3$ и т. д. (рис. 7), то получится линия, называемая траекторией движения. Проводя карандашом по бумаге, мы оставляем на ней след—траекторию движения кончика карандаша. Стрельба трассирующими пулями по цели облегчает пристрелку, так как видна траектория движения пули. Попав в атмосферу Земли и раскалившись, метеорит оставляет на короткое время светящийся след, указывающий траекторию его полёта.

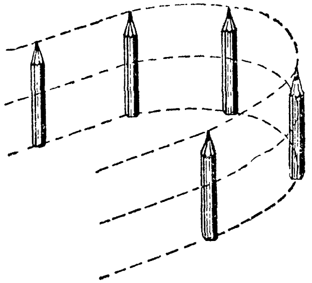


Рис. 6. Поступательное движение карандаша.

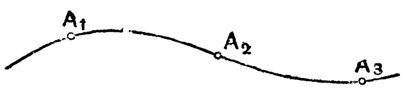



Рис. 7. Траектория движущейся точки.

Отсчёт пройденного пути за заданный промежуток времени производится вдоль траектории от некоторой условно выбранной на траектории точки, например от $A_1$ (рис. 7), в которой в момент начала наблюдений находится тело.

Во всяком движении длина пути, пройденного точкой, зависит от времени. Найти способы определять положение точки на



траектории в любой момент времени—значит установить закон движения точки.

Закон движения может быть выражен различно: его можно представить в виде математической формулы, связывающей величины, характеризующие движение; можно представить в виде таблицы и, наконец, можно изобразить графически в виде некоторой линии.

Движение точки является определённым, если установлена траектория и известен закон движения её по этой траектории.

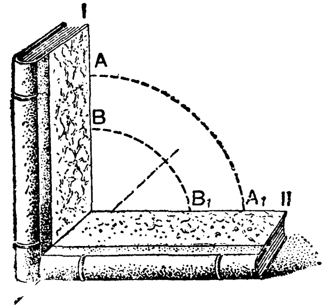



Рис. 8. К упражнению 2.

*Упражнение 2.*

1. Санки скатываются с горы; шарик скатывается по наклонному жёлобу; камень, выпущенный из рук, падает. Какие из этих тел движутся поступательно?

2. Книга, установленная на столе в вертикальном положении (рис. 8, положение I), от толчка падает и занимает положение II. Две точки $A$ и $B$ на переплёте книги при этом описали траектории $AA_1$ и $BB_1$. Можно ли сказать, что книга двигалась поступательно? Почему?

**6. Различные виды движения тела.** Траектория движения тела может быть прямолинейной и криволинейной. Соответственно этому движения тела разделяются на прямолинейные и криволинейные.

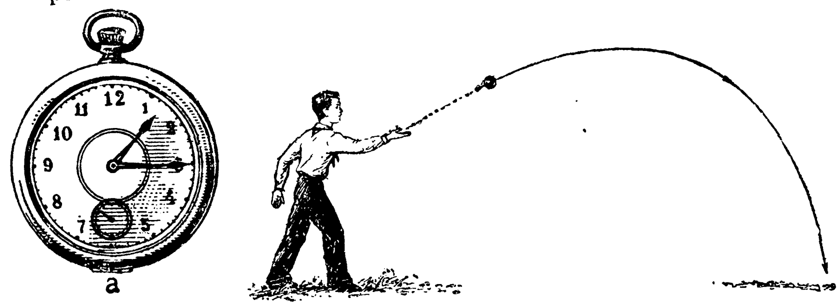



Рис. 9. Примеры криволинейных движений.

На рисунке 9 изображены простейшие примеры криволинейного движения: движение концов стрелок часов и движение мячика, брошенного под углом к горизонту.

Независимо от формы траектории движения резделяются на равномерные и неравномерные.

***Равномерным называется такое движение, при котором в любые равные промежутки времени тело проходит одинаковые пути.***

Так, например, если тело в первую секунду от начала наблюдения за его движением проходит 10 *м*, в каждую следующую — также по 10 *м*, в каждую половину секунды — 5 *м*, в каждую пятую долю секунды — 2 *м* и т. д., то оно движется равномерно.

Примером равномерного движения, наблюдаемого в природе, может служить движение точки земной поверхности при суточном вращении. За равномерное движение можно принимать движение точек часовой стрелки, движение конвейерной ленты на производстве, движение поезда на длинном и ровном перегоне (равномерность этого движения легко установить, прислушиваясь к стукам при ударе колёс о стыки рельсов) и многие другие.

Установим на тележке капельницу (рис. 10) и при помощи груза уравновесим трение колёс тележки о доску. Затем слегка толкнём тележку. Вытекающие из капельницы капли окрашенной жидкости через равные промежутки времени отметят на бумаге пути, пройденные тележкой. Приблизительно эти пути одинаковы; следовательно, движение тележки с капельницей можно принимать за равномерное движение.

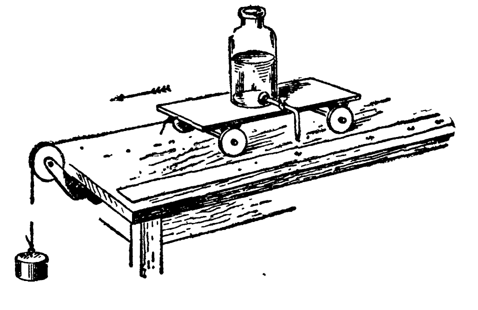


Рис. 10. Равномерное движение тележки с капельницей.

При изучении движения приходится измерять пройденные пути и промежутки времени. Всякие же измерения могут быть произведены только с некоторой степенью точности. Поэтому и равномерность того или иного движения может быть установлена на опыте только с той степенью точности, с которой производятся измерения.

***Упражнение 3.***

Три пассажира, едущие в одном и том же вагоне, условились наблюдать за движением поезда, чтобы установить, движется ли он равномерно.

Первый из них решил пронаблюдать за движением поезда в течение $\frac{1}{2}$ часа, отмечая пути, пройденные в каждые $\frac{1}{4}$ часа. Второй — в течение 5 минут, отмечая пути, пройденные в каждую минуту. Третий же решил определить, в течение скольких секунд поезд проходит каждый километр из первых пяти километров.

*Наблюдение начали в один и тот же момент времени.*

Результаты наблюдений оказались следующие:

Первый пассажир нашёл, что в каждые $\frac{1}{4}$ часа поезд проходил по 15 *км*. Второй — что в каждую минуту наблюдения поезд проходил по 1 *км*. Третий же пассажир установил, что первый километр из пяти был пройден в 65 сек., второй в 54 сек., третий в 57 сек., четвёртый в 58 сек. и последний в 62 сек.



На основании результатов своих наблюдений два первых пассажира утверждают, что поезд движется равномерно, третий же пассажир считает, что поезд движется неравномерно. Кто из них прав?

**7. Скорость движения. Единицы скорости.** Мы часто говорим, что одни тела движутся быстрее, другие медленнее. Самолёт, например, движется быстрее автомобиля, а автомобиль может двигаться быстрее самой резвой лошади. Словами „быстро“ и „медленно“ в обыденной речи характеризуют различие в движении тел. В физике величиной, характеризующей различие в быстроте движения тел, является с к о р о с т ь.

В случае равномерного движения о величине скорости мы можем судить по величине пути, который проходит тело за равные промежутки времени. Чем больший путь пройден телом за одно и то же время, тем больше его скорость, и наоборот. Поэтому величина скорости в равномерном движении характеризуется путём, пройденным телом в единицу времени. Следовательно, для нахождения скорости движения надо измерить две величины: путь и время, за которое пройден этот путь. Тогда частное от деления пути на время даст нам величину скорости.

Обозначим скорость буквой $v$. Если за время $t$ пройден путь $s$, то скорость:

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

***Скоростью равномерного движения называется величина, измеряемая отношением пути ко времени, за которое этот путь пройден.***

Положив в написанной выше формуле $s=1$ ед. пути, $t=1$ ед. времени, получим $v = \frac{1 \text{ ед. пути}}{1 \text{ ед. времени}} = 1$ ед. скорости.

Это значит, что *единицей скорости является скорость такого движения, при котором за единицу времени тело проходит единицу пути.*

Если измерять путь в сантиметрах, а время в секундах, то единицей скорости будет скорость такого движения, при котором тело за 1 сек. проходит 1 *см*. Наименование такой единицы скорости: $1\,\frac{см}{сек}$. Единицами скорости могут быть также: $1\,\frac{м}{сек}$, $1\,\frac{км}{сек}$ и др.

Положим, что поезд, двигаясь с неизменной скоростью, за 2 часа прошёл путь 72 *км*. Вычислим скорость движения поезда: $v = \frac{s}{t}$; $s = 72$ *км*; $t = 2$ часа; $v = \frac{72 \text{ км}}{2 \text{ час}} = 36\frac{км}{час}$.

В данном случае единицей скорости является $1\,\frac{км}{час}$.

Найдём численное значение полученной скорости, приняв за единицу скорости $1\,\frac{м}{сек}$:

$$v = 36\,\frac{км}{час} = 36\,\frac{1000\ м}{3600\ сек} = 10\,\frac{м}{сек}.$$

Если же за единицу скорости принять $1\,\frac{см}{сек}$, то получим следующее численное значение скорости:

$$v = 36\,\frac{км}{час} = 36\,\frac{100\,000\ см}{3600\ сек} = 1000\,\frac{см}{сек}.$$

Таким образом, численное значение величины скорости зависит от выбранной нами единицы скорости, или, что то же, от численных значений пути и времени.

При поступательном движении тела все его точки движутся с одной и той же скоростью. Поэтому скорость какой-либо точки тела одновременно будет скоростью всего тела.

Ниже в таблице приведены скорости некоторых движений, наблюдаемых в природе и в современной технике.

| Движущиеся тела | Скорость в $\frac{м}{сек}$ |
|---|---|
| Земля при её движении вокруг Солнца . . . . | 29 800 |
| Луна вокруг Земли . . . . . . . . . . . . . . | 1000 |
| Артиллерийский снаряд . . . . . . . . . . . | до 1000 |
| Пуля винтовки (в момент вылета из ствола) . . | „ 900 |
| Пассажирский самолёт . . . . . . . . . . . . | „ 300 |
| Современный мощный паровоз с поездным составом . . . | „ 35 |
| Автомобиль „Победа" . . . . . . . . . . . | „ 30 |
| Миноносец . . . . . . . . . . . . . . . | „ 17 |
| Сильный ветер . . . . . . . . . . . . . | „ 12 |
| Течение реки . . . . . . . . . . . . . . | „ 10 |
| Пешеход . . . . . . . . . . . . . . . | „ 1,5—2 |

***Упражнение 4.***

1. Выразить скорости: $54\,\frac{км}{час}$ в $\frac{м}{сек}$; $600\,\frac{см}{сек}$ в $\frac{км}{час}$; $20\,\frac{м}{сек}$ в $\frac{км}{час}$.

2. Пользуясь данными таблицы § 7, выразить скорости самолёта, автомобиля „Победа" и миноносца в $\frac{км}{час}$.

3. В морском деле принимается за единицу скорости у з е л. Вычислить, скольким $\frac{км}{час}$ соответствует 1 узел, если известно, что 1 узел $= 1\,\frac{\text{морская миля}}{\text{час}}$ и 1 морская миля равна длине дуги земного экватора, соответствующей одной минуте градусного измерения (длина дуги экватора равна 39 805 *км*).

**8. Графическое изображение движения.** В технике скорость движения определяется с помощью специальных приборов. Один из таких приборов, называемый с п и д о м е т р о м, устанавливается на автомобиле (рис. 11). Механизм спидометра соеди-



нён с колёсами автомобиля. Скорость движения автомобиля отмечается стрелкой на шкале спидометра. Когда автомобиль движется с переменной скоростью, то стрелка спидометра указывает то на одну, то на другую цифру на шкале; когда же автомобиль движется некоторое время не меняя скорости, стрелка стоит на одном месте шкалы. Спидометр, таким образом, показывает ту скорость, с которой движется автомобиль в каждый данный момент времени.

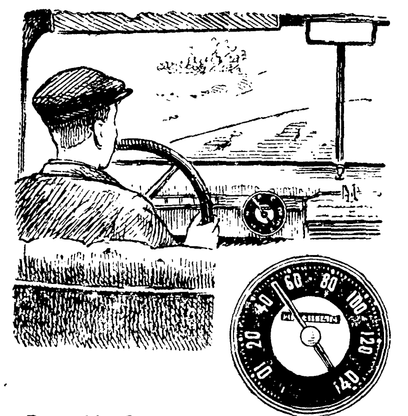



Рис. 11. Спидометр на автомобиле (справа дан в большем масштабе).

Чтобы знать о всех изменениях скорости, которые были при движении автомобиля, для этого пришлось бы составить запись скоростей автомобиля в различные моменты времени. Такую запись можно производить автоматически при помощи специального прибора.

Автоматическая запись производится на специально разграфлённой бумаге, которая при помощи часового механизма равномерно движется под пишущим пером. Перо с помощью особого приспособления связано с указателем прибора скорости. Когда указатель неподвижен, то перо тоже неподвижно и чертит на движущейся бумаге прямую линию (рис. 12). Когда же указатель прибора поднимается или опускается, показывая увеличение или уменьшение скорости, то и перо поднимается или опускается, прочерчивая линию на бумаге. Таким образом, перо отмечает на бумаге все изменения скорости.

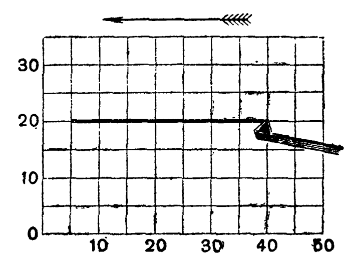



Рис. 12. При движении бумаги относительно пера на ней вычерчивается график движения.

Если на клетчатой бумаге отметить величины скоростей, соответствующие показаниям прибора, то по нашей записи можно будет определить и величину скорости в любой момент времени.

На рисунке 13 изображена одна из таких записей. На этой записи можно прочитать, что вся поездка длилась 1 час 5 мин. (бумага передвигается на одну клетку за 5 мин.). В первые 5 мин. автомобиль развил скорость в $20\,\frac{км}{час}$ (одно деление по вертикали соответствует скорости $5\,\frac{км}{час}$), затем 15 мин. двигался со скоростью 20 $\frac{км}{час}$. К концу 25-й минуты скорость упала до 15 $\frac{км}{час}$; с этой скоростью автомобиль двигался 10 минут, затем скорость начала падать, и автомобиль остановился на 10 мин. Пос-

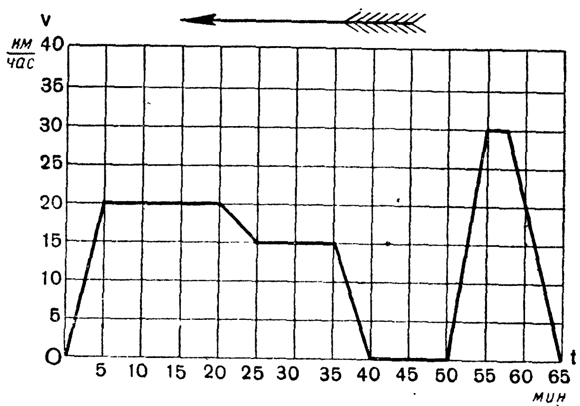



Рис. 13. Пример графика скорости.

ле остановки автомобиль за 5 мин. развил скорость до 30 $\frac{км}{час}$, а затем через 10 мин. снова остановился.

Можно автоматически записывать не только скорости движения автомобиля, но и пройденные им пути. На рисунке 14

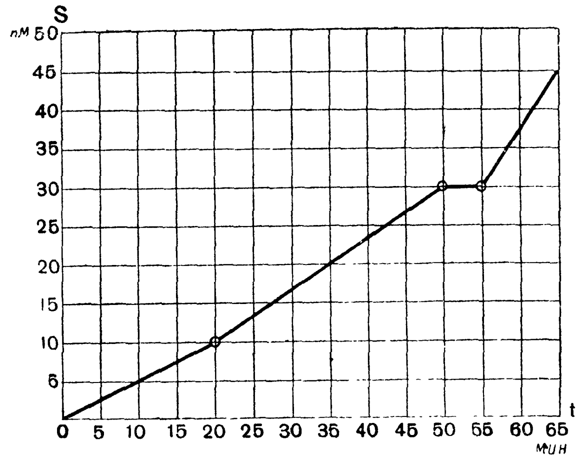



Рис. 14. Пример графика пути.

приведена одна из таких записей. По этой записи видно, что через 20 мин. от начала движения автомобиль прошёл 10 *км*. За следующие 30 мин. автомобиль прошёл 20 *км*, затем 5 мин. стоял на месте и последние 15 *км* прошёл за 10 мин.



Такие записи движения, или, как их называют, графики движения, дают наглядное представление об изучаемом движении.

**9. Уравнение равномерного движения.** В § 6 было установлено, что при равномерном движении пути, проходимые в равные промежутки времени, одинаковы; поэтому при увеличении промежутка времени в несколько раз во столько же раз увеличивается и путь. Так, если за $t$ сек. пройден путь $s$ *см*, то за 2 $t$ сек. путь будет 2 $s$ *см*, за 3 $t$ сек.—3 $s$ *см* и т. д. Скорость $v$ на этих участках пути выразится так:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2s}{2t} = \frac{3s}{3t} = \ldots$$

А это значит, что скорость $v = \frac{s}{t}$ при равномерном движении одна и та же на всех участках пути.

Итак, можно сказать, что *равномерное движение есть движение с постоянной скоростью.*

Зная скорость равномерного движения, можно найти путь, пройденный за время $t$, по формуле:

$$s = vt.$$

Написанная формула называется уравнением равномерного движения. Это уравнение математически выражает зависимость пройденного пути от времени: ***пройденный путь при равномерном движении прямо пропорционален времени.***

Пример. Самолёт летит со скоростью 360 $\frac{км}{час}$. Какое расстояние пройдёт самолёт за 1 мин.?

Решая эту задачу по формуле $s = vt$, мы должны предварительно либо скорость выразить в $\frac{км}{мин}$, либо время в часах. Очевидно, последнее сделать проще, так как 1 мин. $= \frac{1}{60}$ часа; тогда $s = 360\ \frac{км}{час} \cdot \frac{1}{60}\ час = 6\ км$.

При решении подобных задач необходимо, чтобы все величины были выражены в надлежащих единицах.

*Упражнение 4а.*

1. Два автомобиля движутся равномерно. Первый в течение 5 мин. проходит 6 *км*, а второй в течение 3 сек.—90 *м*. Скорость какого автомобиля больше?

2. Пароход, двигаясь против течения со скоростью 14 $\frac{км}{час}$, проходит расстояние между двумя пристанями за 4 часа. За какое время он пройдёт то же расстояние по течению, если его скорость в этом случае равна 5,6 $\frac{м}{сек}$?

3. В подрывной технике для взрыва шпуров (скважин, наполненных взрывчатым веществом) применяют особый, сгорающий с небольшой скоростью шнур (бикфордов шнур). Какой длины шнур надо взять, чтобы успеть, после того как он зажжён, отбежать на расстояние 150 *м*, если скорость бега 5 $\frac{м}{сек}$, а скорость распространения пламени по шнуру 0,8 $\frac{см}{сек}$?

**10. График пути равномерного движения.** Зависимость пути от времени при равномерном движении может быть выражена не только алгебраически, в виде формулы, но и чертежом — графически.

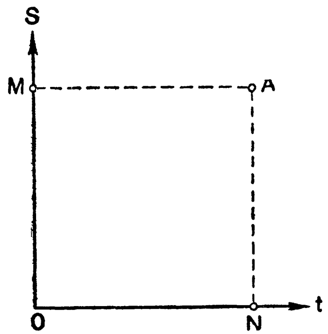


Рис. 15. Оси координат (ось времён и ось пройденных путей).

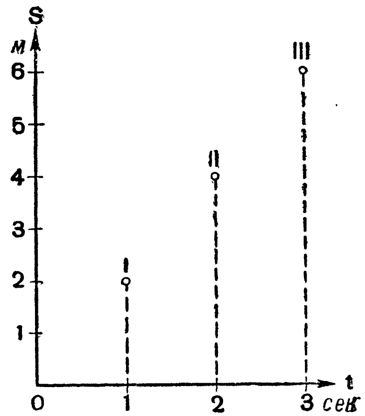


Рис. 16. Построение графика пути равномерного движения.

Проведём две взаимно перпендикулярные линии $Ot$ и $OS$. Эти линии будем называть осями координат (рис. 15), ось $Ot$ — осью времён, а ось $OS$ — осью пройденных путей. Точка $O$ пересечения осей обозначает начало отсчётов и для времени и для пути. Отложим в определённом масштабе как на оси $Ot$, так и на оси $OS$ равные отрезки. Возьмём где-нибудь на нашем чертеже точку $A$. Опустим из этой точки перпендикуляры на обе оси. Тогда на оси времён получим отрезок $ON$, численно равный промежутку времени, а на оси путей — отрезок $OM$, соответствующий пройденному пути. Но $ON = AM$, где $AM$ есть расстояние от точки $A$ до оси пройденных путей, а $OM = AN$ — расстояние от точки $A$ до оси времён.

Итак, расстояние, измеряемое от какой-либо точки до оси путей, на чертеже соответствует некоторому промежутку времени, а расстояние от этой точки до оси времён — некоторому пути.

Построим график пути равномерного движения со скоростью $v = 2\ \frac{м}{сек}$. По формуле $s = vt$ рассчитаем пройденные в этом движении пути за 1, 2, 3 и т. д. секунды и результаты расчёта запишем в таблицу (стр. 20).



Соответственно данным таблицы на оси времён отложим отрезки, соответствующие 1, 2, 3 секундам (рис. 16). Из концов полученных отрезков проведём перпендикуляры к этой оси и на них отложим пути, пройденные за одну, две и три секунды.

| Время в сек. | Путь в *м* |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 2 |
| 2 | 4 |
| 3 | 6 |
| И т. д. | |

Соединив точки I, II, III, ..., мы получим прямую (рис. 17), которая называется графиком пути равномерного движения.

Расстояние между любой точкой этой прямой и осью пройденных путей определит промежуток времени, а расстояние между этой точкой и осью времён — путь, пройденный телом в течение этого промежутка времени.

Так, например, расстояние $AM$ от точки $A$ (рис. 17) до оси пройденных путей соответствует 2,5 сек., а расстояние $AN$ от той же точки до оси времён — отрезку пути в 5 *м*, следовательно, за 2,5 сек. пройден путь, равный 5 *м*.

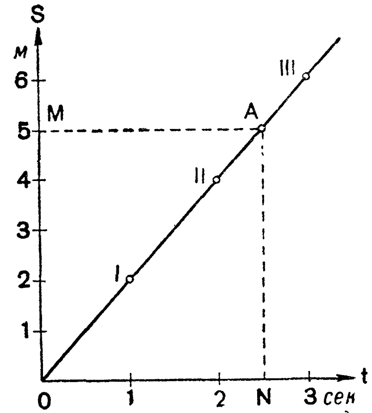


Рис. 17. График пути равномерного движения.

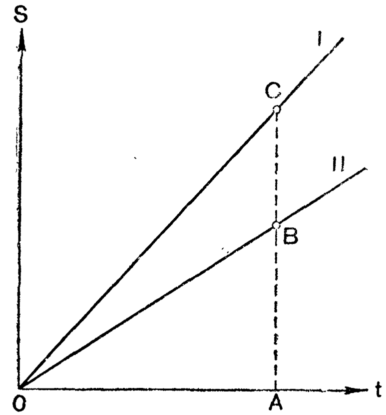


Рис. 18. Графики путей двух равномерных движений.

На рисунке 18 даны графики путей двух равномерных движений, обозначенные цифрами I и II. Скорость какого из этих движений больше? Чтобы ответить на этот вопрос, возьмём на оси времён промежуток времени, изображённый отрезком $OA$. Из конца этого отрезка проведём перпендикуляр до пересечения с нашими графиками. Отрезки этого перпендикуляра $AC$ и $AB$ определят пути, пройденные в течение одного и того же промежутка времени $OA$ в обоих движениях.

Так как $AC$ больше $AB$, то и скорость первого движения больше скорости второго.

*Упражнение 5.*

1. Определить по графику пути равномерного движения, изображённому на рисунке 19: путь, пройденный телом в течение 4,5 сек.; время, в течение которого пройден путь 15 *м*, и скорость движения, если сторона клетки соответствует 1 *м* и 1 сек.

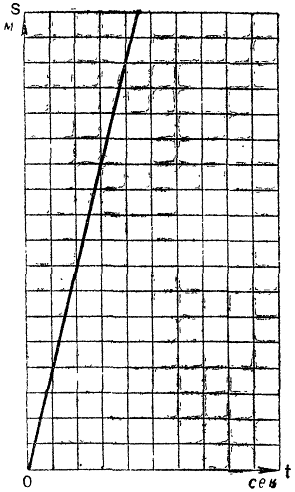


Рис. 19. К упражнению 1.

2. Построить на одном и том же чертеже графики путей двух равномерных движений со скоростями 7,2 $\frac{км}{час}$ и 18 $\frac{км}{час}$.

3. Построить график пути движения, уравнение которого $s = 5\,t$.

4. На рисунке 20 дан график пути движения поезда. Определить, в котором часу отправился поезд и направление его движения.

5. На рисунке 21 дан график пути движения поезда. Определить скорости движений на участках, изображённых отрезками графика *OA*, *AB* и *BC*; какой путь пройден поездом в течение 3 часов.

6. Построить график пути движения поезда между двумя станциями *A* и *B* по следующим данным. Расстояние от *A* до *B* равно 60 *км*. Двигаясь от *A* к *B* со скоростью 40 $\frac{км}{час}$, поезд на полпути делает пятиминутную остановку, потом продолжает двигаться дальше со скоростью 60 $\frac{км}{час}$. На станции *B* поезд стоит 20 мин., затем движется обратно без остановок со скоростью 45 $\frac{км}{час}$.

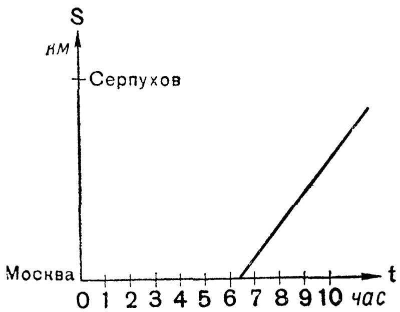


Рис. 20. К упражнению 4.

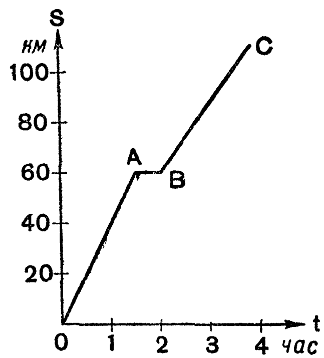


Рис. 21. К упражнению 5.

7. От одной и той же станции в одном и том же направлении отправляются два поезда. Скорость первого 30 $\frac{км}{час}$, второго 40 $\frac{км}{час}$. Второй поезд отправляется через 10 мин. после первого. После сорокаминутного движения



первый поезд делает пятиминутную остановку, потом продолжает двигаться дальше с прежней скоростью.

Определить графически, когда и на каком расстоянии от станции второй поезд догонит первый. Графическое решение проверить вычислением.

8. Чем отличаются движения I и II, графики которых даны на рисунках 22 и 23? Что обозначает точка пересечения графиков и что по ней можно узнать?

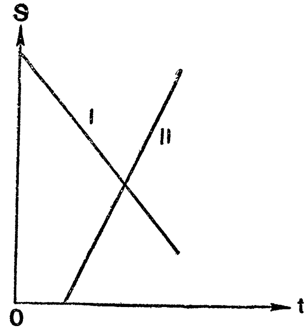


Рис. 22. К упражнению 8.

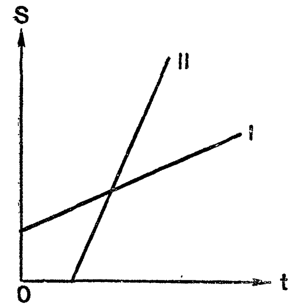


Рис. 23. К упражнению 8.

**11. График скорости равномерного движения.** Начертим оси координат и на вертикальной оси будем откладывать отрезки, соответствующие в некотором условном масштабе скоростям движения тела. Назовём эту ось осью скоростей ($Ov$). На другой же оси (оси времён $Ot$) будем откладывать отрезки, соответствующие промежуткам времени (рис. 24). Так как скорость равномерного движения не меняется со временем, то график её будет представлять собой прямую линию *MN*, параллельную оси времён. Если взять на этом графике какую-нибудь точку *A*, то отрезок прямой *AB* между этой точкой и осью времён будет численно равен скорости данного равномерного движения.

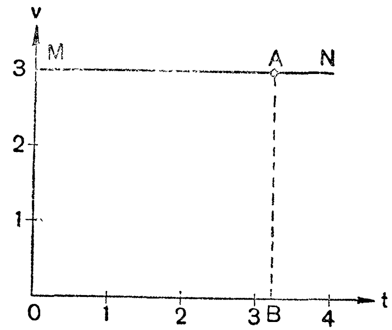


Рис. 24. График скорости равномерного движения.

Пользуясь графиком скорости, можно определить и путь, пройденный телом за определённый промежуток времени.

Допустим, что велосипедист движется равномерно со скоростью 3 $\frac{м}{сек}$. На рисунке 25 изображён график скорости этого движения в масштабе: 1 *см* — 1 $\frac{м}{сек}$; 1 *см* — 1 *сек*.

Чтобы найти путь, пройденный велосипедистом в течение, например, 4 сек., необходимо скорость умножить на время, то есть численное значение отрезка $0-3$, отложенного на оси скоростей, помножить на численное значение перпендикулярного к нему отрезка $0-4$, отложенного на оси времён. В результате мы получим величину площади заштрихованного прямоугольника. Площадь заштрихованного прямоугольника содержит столько же масштабных единиц площади (малый заштрихованный квадрат), сколько метров проехал велосипедист в течение 4 сек.

Таким образом, на графике скорости равномерного движения численное значение пути равно численному значению площади прямоугольника, одна сторона которого равна скорости движения, а другая — времени движения.

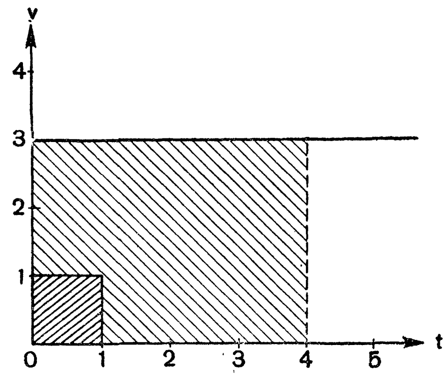


Рис. 25. Определение пройденного пути по графику скорости.

*Упражнение 6.*

Построить на одном чертеже графики скоростей двух равномерных движений: $v_1 = 3\ \frac{м}{сек}$ и $v_2 = 5\ \frac{м}{сек}$. Построить на том же чертеже прямоугольники, площади которых численно равны путям, пройденным в течение 6 сек.

**12. Сложение движений**. Движение любого тела можно рассматривать как сложное движение, состоящее из нескольких простых движений. Так, например, движение человека по палубе парохода относительно берега можно рассматривать как сложное движение, состоящее из движения человека относительно парохода и движения парохода относительно берега.

Движения человека относительно парохода и парохода относительно берега называются составляющими движениями, а движение человека относительно берега результирующим движением.

Изучив законы составляющих движений, можно установить и закон результирующего движения.

*Определение результирующего движения по данным составляющим движениям называется сложением движений.*

Рассмотрим движение лодки по течению. Допустим, что под влиянием усилий гребца лодка перемещается относительно воды со скоростью $v_1 = 4\ \frac{км}{час}$, вода же течёт относительно берега со скоростью $v_2 = 3\ \frac{км}{час}$. Какое расстояние пройдёт лодка за время $t = 5$ час.?

Если бы не было течения, то лодка за 5 час. прошла бы вниз по реке расстояние $s_1 = 4\ \frac{км}{час} \cdot 5\ час = 20\ км.$

Одно же течение перенесло бы лодку на расстояние

$$s_2 = 3\ \frac{км}{час} \cdot 5\ час = 15\ км.$$

Но так как лодку одновременно перемещают и гребец и течение, то за 5 час. она пройдёт вниз по реке расстояние:

$$s = 20\ км + 15\ км = 35\ км.$$

Что изменится, если скорости останутся по величине такими же, но гребец будет грести против течения?

Очевидно, что лодка под одновременным действием гребца и течения пройдёт те же расстояния, как и в первом случае, но теперь гребец за 5 час. передвинет лодку на расстояние 20 *км* вверх по реке, а течение за то же время снесёт лодку на расстояние 15 *км* вниз. В результате лодка, двигаясь по прямой, за 5 час. пройдёт вверх по реке расстояние:

$$s = 20\ км - 15\ км = 5\ км.$$

Если путь вверх по реке считать положительным, а вниз — отрицательным, то можно написать, что

$$s = 20\ км + (-15\ км) = 5\ км.$$

В том и другом случае для нахождения пути сложного движения нужно алгебраически сложить пути составляющих движений.

Если бы на лодку действовал ветер в направлении её движения, то очевидно, что путь, пройденный лодкой за то же время, сложился бы из трёх путей составляющих движений (из пути, пройденного под действием гребца, течения и ветра).

Таким же образом можно найти путь, пройденный телом в сложном движении, состоящем из какого угодно числа равномерных движений, направленных по одной прямой.

Если $s$ — путь результирующего движения, а $s_1$, $s_2$, $s_3$ и т. д. — пути составляющих движений, то можно написать:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + \dots \qquad (1)$$

При этом пути, пройденные в одном направлении, считаются положительными, а пройденные в противоположном — отрицательными.

Если составляющие движения равномерны, то пройденные пути $s_1$, $s_2$, $s_3$ возрастают пропорционально времени. В этом случае и путь результирующего движения, равный сумме путей составляющих движений, также растёт пропорционально времени. Следовательно, и результирующее движение является также равномерным движением.

Итак, ***результирующее движение, состоящее из нескольких равномерных прямолинейных движений, есть тоже равномерное прямолинейное движение.***

Вычислим, чему равна скорость результирующего движения. Разделим все члены равенства (1) на время движения:

$$\frac{s}{t} = \frac{s_1}{t} + \frac{s_2}{t} + \frac{s_3}{t} + \ldots \qquad (2)$$

Но $\frac{s}{t} = v$ — скорость результирующего движения, а $\frac{s_1}{t} = v_1$, $\frac{s_2}{t} = v_2$, $\frac{s_3}{t} = v_3 \ldots$ — скорости слагаемых движений; следовательно, равенство (2) можно написать так:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + \ldots$$

***Скорость результирующего движения, состоящего из равномерных прямолинейных движений, равна алгебраической сумме скоростей составляющих движений.***

При этом за положительную скорость принимается скорость такого движения, в направлении которого отсчитываются положительные пути, а отрицательной скорости соответствуют отрицательные пути.

*Упражнение 7.*

1. Расстояние между двумя пристанями 144 *км*. Сколько времени потребуется пароходу для совершения рейса между указанными пристанями туда и обратно, если скорость парохода в стоячей воде 18 $\frac{км}{час}$, а скорость течения 3 $\frac{м}{сек}$?

2. Самолёт, летящий со скоростью 300 $\frac{км}{час}$, пролетел расстояние между аэродромами *A* и *B* в течение 2,2 часа. Обратный полёт из-за встречного ветра он совершил в 2,4 часа. Определить скорость ветра.

3. С двух пристаней, расстояние между которыми 70 *км*, одновременно отправляются два парохода навстречу друг другу. Пароходы встретились через 2,5 часа, причём пароход, идущий по течению, прошёл за это время путь 55,5 *км*. Скорость течения 2 $\frac{м}{сек}$. Определить скорости пароходов в стоячей воде.

**13. Скорость-вектор.** Для определения движения недостаточно знать величину пути, пройденного телом, и величину его скорости. Необходимо знать ещё направление движения. Так, например, чтобы определить, где будет находиться самолёт, вылетевший из Москвы со скоростью 400 $\frac{км}{час}$, через 2 часа, необходимо указать, в каком направлении он летел.



Чтобы полностью определить движение тела, условились указывать направление скорости. Для этого скорость изображают отрезком прямой, совпадающим по направлению с направлением движения тела. Стрелка на конце указывает, в какую сторону по этому направлению движется тело. Длина же отрезка в условном масштабе изображает величину скорости.

***Величины, определяемые не только своим численным значением, но и направлением в пространстве, называются векторными величинами, или векторами.***

Скорость есть вектор.

Всякий вектор можно изобразить направленным отрезком. На рисунке 26 направленные отрезки прямой изображают две ско-

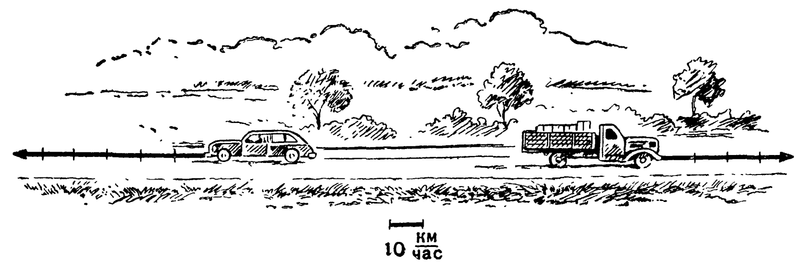



Рис. 26. Векторы различных скоростей.

рости, различные по величине и по направлению. При изучении физики мы встретимся со многими другими векторными величинами.

В отличие от векторных величин существуют величины, которым нельзя приписать никакого направления в пространстве. Они могут отличаться только величиной и иногда знаком. Такие величины называются скалярными, или скалярами.

К скалярным величинам относятся время, температура, масса, работа, энергия и многие другие величины.

*Упражнение 8.*

1. Лошадь везёт повозку по шоссе в юго-восточном направлении со скоростью 10,8 $\frac{км}{час}$. Выразить эту скорость в $\frac{м}{сек}$ и изобразить её графически.

2. Пароход движется со скоростью 24 $\frac{км}{час}$ на северо-восток. На север летит самолёт со скоростью 200 $\frac{км}{час}$. Изобразить на чертеже эти скорости.

3. Дождевые капли при ветре падают косо. Допустим, что направление движения капель образует с вертикалью угол в 30° и капли движутся со скоростью 5 $\frac{м}{сек}$. Изобразить скорость капель графически.

**14. Сложение равномерных прямолинейных движений, направленных под углом друг к другу.** В некоторых случаях интересующее нас движение мы можем рассматривать как результат сложения нескольких движений, направленных под углом друг к другу. Таково, например, движение лодки поперёк реки или движение самолёта при боковом ветре.

Рассмотрим на примере движения лодки, каким будет результирующее движение двух равномерных и прямолинейных движений, направленных под углом друг к другу.

Если бы течение отсутствовало, то лодка под влиянием усилий гребца перемещалась бы по направлению $OB$ (рис. 27), последовательно переходя через равные промежутки времени в положения, обозначенные на чертеже точками $B_1$, $B_2$, $B_3$ и т. д.

Но течение в те же равные промежутки времени перемещает лодку по прямой $OA$ в положения, обозначенные на рисунке точками $A_1$, $A_2$, $A_3$ и т. д.

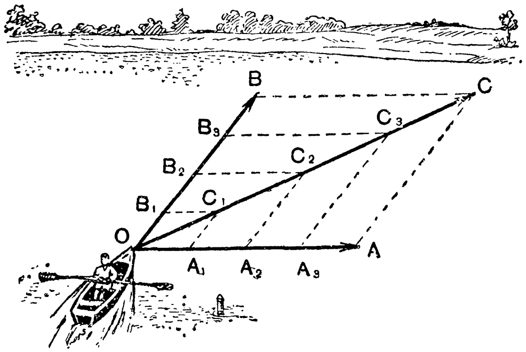


Рис. 27. Сложение движений лодки и воды.

Участвуя одновременно в двух движениях, лодка под влиянием усилий гребца за единицу времени пройдёт путь $OB_1$, а течением реки за это же время будет отнесена на расстояние $OA_1$, то есть действительное движение лодки относительно берега будет происходить по линии $OC$ через точки $C_1$, $C_2$, $C_3$ и т. д.

Из рисунка видно, что линия $OC$ представляет собой диагональ параллелограма $OBCA$, стороны которого $OB$ и $OA$ есть пройденные пути в составляющих движениях. Видно также, что пути, проходимые лодкой вдоль диагонали $OC$ за равные промежутки времени, равны между собой: $OC_1 = C_1C_2 = C_2C_3 = C_3C$; следовательно, результирующее движение лодки, происходящее по диагонали параллелограма, есть движение равномерное и прямолинейное.

Эти выводы, полученные нами при рассмотрении движения лодки, справедливы и для всех случаев, когда тело участвует одновременно в двух движениях. Чтобы в этом убедиться, проделаем опыты.

Закрепим на доске конец нити, на которой подвешен небольшой шарик (рис. 28). Подденем под нить у верхнего её конца $A_1$ карандаш и будем двигать его горизонтально вдоль доски, проходя точки $B_1$, $C_1$, $D_1$. Тогда шарик будет одновременно двигаться вертикально вверх и горизонтально. Относительно же доски он будет перемещаться через точки $B$, $C$, $D$, то есть



по диагонали прямоугольника, построенного на составляющих перемещениях как на сторонах.

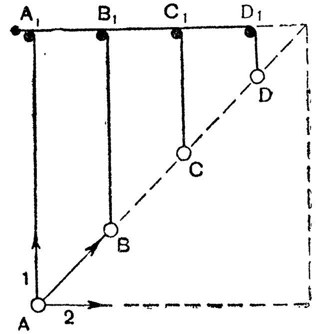


Рис. 28. Сложное движение шарика, подвешенного на нити.

Если двигать карандаш не горизонтально, а как-нибудь наклонно, например так, как изображено на рисунке 29, то и в этом случае относительно доски шарик будет перемещаться по диагонали параллелограма.

Итак, опыт показывает, что ***если тело участвует одновременно в двух равномерных прямолинейных движениях, направленных под углом друг к другу, то результирующее движение его будет равномерное и прямолинейное. Пройденный путь в этом движении изображается диагональю параллелограма, построенного на пройденных путях составляющих движений как на сторонах.***

***Упражнение 9.***

1. На лодке плывут поперёк реки шириной 48 *м*, причём, пока переплывают реку, течение сносит её вниз на 36 *м*. Определить путь сложного движения лодки графически.

2. Подъёмный кран (см. рис. 3 на стр. 9) передвигается по горизонтали на 6 *м*. В то же время переносимый груз опускается на 4 *м*. Определить путь сложного движения груза графически.

**15. Сложение скоростей.** От сложения движений легко перейти к сложению скоростей. Обратимся к рисунку 30.

Пусть стороны параллелограма представляют собой пройденные пути $s_1$ и $s_2$ двух одновременно происходящих равномерных прямолинейных движений за один и тот же промежуток времени, а диагональ параллелограма — пройденный путь $s$ результирующего движения. Если пройденные пути разделить на время движения $t$, то получим скорости соответствующих движений:

$$v_1 = \frac{s_1}{t};\ v_2 = \frac{s_2}{t} \text{ и } v = \frac{s}{t}.$$

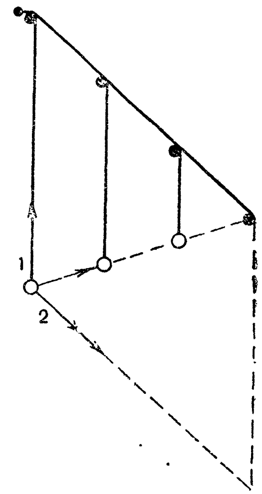


Рис. 29. Сложное движение шарика, подвешенного на нити.

Мы знаем, что направление скорости прямолинейного движения совпадает с направлением движения (§ 13). Из точки $O$ отложим на направлениях движений векторы этих скоростей. Соединив концы векторов $v_1$ и $v_2$ с концом вектора $v$ прямыми линиями, мы получим параллелограм $OV_2VV_1$.

Следовательно, ***скорость результирующего движения по величине и направлению изображается диагональю параллелограма, построенного на скоростях составляющих движений как на сторонах.***

Этот вывод называется правилом параллелограма скоростей.

*Правило параллелограма справедливо не только для скоростей, но и для всяких векторов.*

***Упражнение 10.***

1. Моторная лодка, скорость которой в спокойной воде 8 $\frac{км}{час}$, направлена поперёк течения реки. Скорость течения 6 $\frac{км}{час}$. Определить графически скорость сложного движения лодки.

2. В спокойном воздухе парашютист, приземляясь, имеет скорость 5 $\frac{м}{сек}$. Какова будет скорость приземления, если дует ветер, относящий парашютиста в горизонтальном направлении со скоростью 4 $\frac{м}{сек}$? Решить задачу графически.

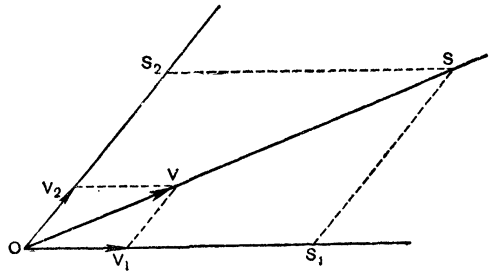


Рис. 30. Сложение скоростей.

3. Самолёт летит на север со скоростью 60 $\frac{м}{сек}$. Дует западный ветер со скоростью 10 $\frac{м}{сек}$. Определить графически результирующую скорость самолёта.

4. Показать чертежом, как следовало бы направить лодку, упоминаемую в задаче 1, чтобы она переплыла реку по прямой, перпендикулярной к направлению течения. Какова в этом случае была бы скорость сложного движения лодки?

**16. Разложение скорости.** На рисунке 31 изображён самолёт, поднимающийся вверх под некоторым углом к горизонту со скоростью $v$.

Допустим, что нам необходимо узнать, с какой скоростью самолёт поднимается вертикально вверх и с какой скоростью он движется в горизонтальном направлении. Представим скорость самолёта, состоящей из скорости, направленной горизонтально, и скорости, направленной вертикально. Для этого воспользуемся правилом параллелограма. Пусть диагональ в этом параллелограме изображает вектор скорости самолёта $v$.

Из начала вектора $v$ проводим две взаимно перпендикулярные линии, одну в вертикальном, другую в горизонтальном направлении. Затем из конца этого вектора проводим линии, параллельные двум заданным направлениям. Они отсекут отрезки, численные значения которых будут равны горизонтальной составляющей скорости $v_1$ и вертикальной $v_2$.

*Нахождение по данной скорости её составляющих называется разложением скорости.*

Разложение скорости на составляющие обратно действию сложения скоростей.

Так как любую скорость можно рассматривать как результирующую скорость, то, следовательно, любую скорость можно разложить на составляющие.

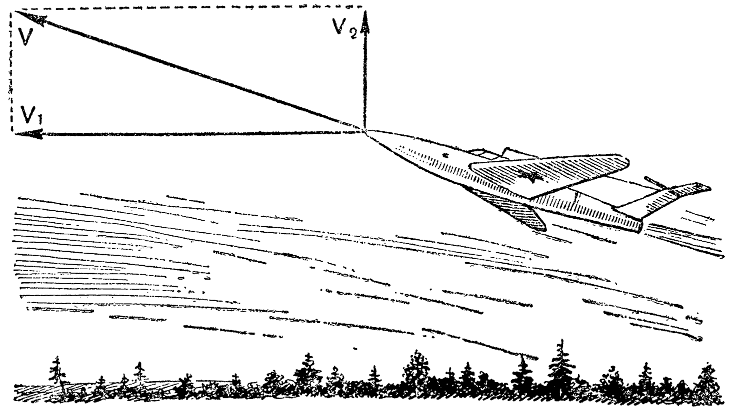


Рис. 31. Разложение скорости $v$ на горизонтальную—$v_1$ и вертикальную — $v_2$ составляющие.

Важно подчеркнуть, что данную скорость можно представить в виде диагонали множества параллелограмов с различными сторонами. Следовательно, данную скорость можно разложить на множество пар различных скоростей. В практике чаще всего встречаются случаи разложения скорости на две взаимно перпендикулярные составляющие. Такая задача и была решена нами.

***Упражнение 11.***

1. Лодка движется с некоторой скоростью под углом к берегу. Определить, на какое расстояние ежесекундно лодка удаляется от берега по направлению, перпендикулярному к нему, и на сколько за то же время она перемещается по направлению вдоль берега. Решить задачу графически, если известно, что лодка движется со скоростью 3 $\frac{м}{сек}$ под углом 60° к берегу.

2. Ствол орудия установлен под углом 60° к горизонту. Скорость снаряда при вылете из дула 800 $\frac{м}{сек}$. Найти горизонтальную составляющую этой скорости. Определить, какое расстояние пройдёт снаряд по горизонтальному направлению в течение 5 сек. Сопротивление воздуха в расчёт не принимать

# ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

**17. Средняя скорость неравномерного движения.** Большинство движений, наблюдаемых нами в природе и технике,— движения переменные, то есть неравномерные. Таковы, например, движения автомобиля, трактора, поезда, людей, животных и др.

Для характеристики неравномерного движения на каком-нибудь участке пути вводится понятие средней скорости движения.

Рассмотрим пример. Допустим, что расстояние от Москвы до Горького (440 *км*) поезд прошёл за 11 час. Движение поезда на всём пути было явно неравномерное: он то ускорял движение, то замедлял и даже останавливался на промежуточных станциях. Но если бы путь в 440 *км* поезд прошёл за 11 час., двигаясь равномерно, то его скорость была бы: $\frac{s}{t}=\frac{440\,км}{11\,час}=40\,\frac{км}{час}$. Скорость $40\,\frac{км}{час}$ является средней скоростью неравномерного движения на участке Москва — Горький.

***Средняя скорость неравномерного движения на данном участке пути измеряется отношением длины участка пути к промежутку времени, в течение которого этот путь пройден***:

$$v_{ср.}=\frac{s}{t}.$$

Но так же рассчитывается и скорость равномерного движения. Следовательно, можно сказать, что ***средняя скорость неравномерного движения равна скорости такого равномерного движения, при котором тело проходит тот же путь и за такой же промежуток времени, как и при данном неравномерном движении.***

Если известны время и средняя скорость неравномерного движения на некотором участке пути, то длину этого участка пути можно рассчитать по формуле:

$$s=v_{ср.}\,t.$$



***Упражнение 12.***

1. Поезд прошёл 25 *км* за 35 мин., причём первые 10 *км* он прошёл в течение 18 мин., вторые 10 *км* в течение 12 мин., а последние 5 *км* за 5 мин. Определить среднюю скорость поезда на каждом участке и на всём пути.
2. Санки, двигаясь вниз по горе, прошли в течение первой секунды движения 2 *м*, второй секунды 6 *м*, третьей секунды 10 *м* и четвёртой секунды 14 *м*. Найти среднюю скорость за первые две секунды, за последние две секунды и за всё время.
3. Почему нельзя говорить о средней скорости переменного движения вообще, а можно говорить только о средней скорости за данный промежуток времени или о средней скорости на данном участке пути?

**18. Мгновенная скорость.** В каждый момент времени тело движется с определённой скоростью, и каждому моменту времени соответствует определённая точка на траектории.

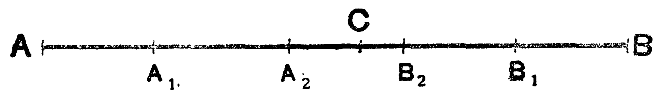



Рис. 32. К понятию мгновенной скорости.

*Скорость, которую имеет тело в данный момент времени или в данной точке траектории, называется мгновенной скоростью.*

При равномерном движении тела его скорость во всех точках траектории одинакова. Это и будет его мгновенная скорость. Сложнее дело обстоит в случае неравномерного движения.

Допустим, что тело, двигаясь неравномерно-прямолинейно, за $t$ сек. прошло путь $AB=s$ (рис. 32). Средняя скорость этого движения $v_{ср.}=\frac{s}{t}$. Эта скорость, вообще говоря, не характеризует движения в какой-нибудь точке пути $C$ и не определяет величину скорости в этой точке. Чтобы определить скорость в точке $C$, поступим следующим образом.

Разобьём весь наш путь $AB$ на отдельные участки и определим среднюю скорость на участке пути $A_1B_1$, меньшем $AB$; затем на участке $A_2B_2$, меньшем $A_1B_1$, и т. д., всё ближе и ближе подходя к точке $C$. По мере уменьшения участка пути, включающего точку $C$, а следовательно, и по мере уменьшения промежутка времени, за который этот участок проходится, изменение скорости на нём будет всё меньше и меньше. Движение за такие малые промежутки времени практически будет равномерным; скорость этого движения и можно принять за мгновенную скорость неравномерного движения в заданной точке траектории.

Подобные рассуждения можно провести относительно любой точки, взятой на траектории $AB$.

Подкрепим теперь наши общие рассуждения о мгновенной скорости числовыми данными. Допустим, что четыре наблюдателя определяют скорость автомобиля в момент его прохождения мимо какого-нибудь предмета у дороги. С момента прохождения автомобиля мимо этого предмета все наблюдатели одновременно измеряют пути, пройденные автомобилем от этого предмета за различные промежутки времени. Результаты их наблюдений следующие:

| Наблюдатель | Время наблюдения | Пройденный путь в *км* | Скорость в $\frac{км}{час}$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 мин $= \frac{1}{12}$ час. | 2,5 | 30 |
| 2 | 1 мин. $= \frac{1}{60}$ час. | 0,47 | 28 |
| 3 | 30 сек. $= \frac{1}{120}$ час. | 0,21 | 25 |
| 4 | 3 сек. $= \frac{1}{1200}$ час. | 0,02 | 24 |

Какая же из полученных величин скорости ближе к мгновенной скорости, которую имел автомобиль, проезжая мимо указанного выше предмета? Такой скоростью, очевидно, будет скорость, вычисленная из результата измерений четвёртого наблюдателя, так как за 3 сек. автомобиль меньше всего изменил свою скорость. Итак, чем меньше взять промежуток времени, тем точнее можно определить искомую скорость тела в заданный момент времени.

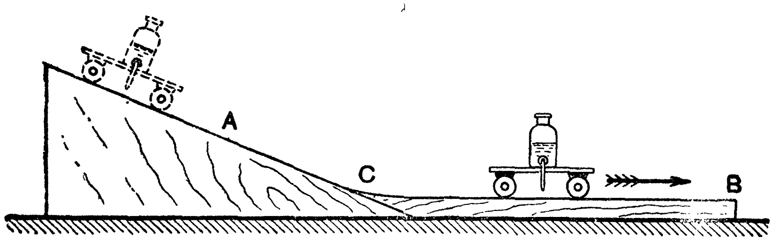



Рис. 33. Определение мгновенной скорости на опыте.

Мгновенную скорость можно определить на опыте. Обратимся к рисунку 33. С наклонной плоскости скатывается тележка с капельницей. По отметкам, оставляемым капельницей, легко установить, что тележка движется неравномерно. Допустим, нам нужно определить мгновенную скорость тележки в какой-либо точке наклонной плоскости, например у её основания *C*. Для этого к наклонной плоскости в точке *C* присоединим горизонтальный жёлоб *CB*.



Пользуясь капельницей, так же как в опыте, описанном на странице 13, легко установить, что когда тележка проходит точку *C*, то дальше она на небольшом отрезке пути от точки *C* движется равномерно. Следовательно, скорость в точке *C* будет такой же, как на всём дальнейшем пути равномерного движения. Отмечая время равномерного движения какой-либо точки на тележке и измеряя пройденный ею путь, можно определить скорость равномерного движения; она и будет искомой мгновенной скоростью в точке *C*.

Для определения мгновенной скорости в какой-либо другой точке *A* нужно только поднять горизонтальную часть плоскости *CB* на уровень точки *A* и произвести такие же измерения, как и для точки *C*.

*Мгновенные скорости движения автомобиля отмечаются стрелкой на шкале спидометра.*

***Упражнение 13.***

1. Какую скорость имеют в виду, говоря о скорости движения поезда, автомобиля или самолёта между двумя какими-нибудь пунктами?

2. Пуля вылетела из ствола со скоростью $600 \frac{м}{сек.}$. Какую скорость имеют здесь в виду?

3. Показать, что средняя скорость неравномерного движения за какой-нибудь промежуток времени больше наименьшего и меньше наибольшего значения мгновенной скорости за этот промежуток времени. Воспользоваться для этого графическим изображением пройденного пути при равномерном движении на графике скорости.

**19. Ускорение.** Среди разнообразных переменных движений встречаются движения, в которых скорость непрерывно возрастает. Такие движения называются ускоренными.

Ускоренно, например, движется поезд, отходящий от станции и постепенно увеличивающий свою скорость, поднимающийся в воздух самолёт, пуля в канале ружья и т. д. В сущности начало всякого движения является движением ускоренным, так как всякое тело, начиная двигаться, не мгновенно „набирает“ свою скорость.

В разных ускоренных движениях скорость изменяется по-разному—в одних быстрее, в других медленнее. Сравним, например, движение поезда при отходе со станции с движением снаряда в стволе орудия при выстреле. Оба эти движения ускоренные. Но в то время как скорость поезда возрастает медленно, скорость снаряда за какие-нибудь сотые доли секунды увеличивается от нуля до сотен метров в секунду.

Таким образом, ускоренные движения отличаются одно от другого быстротой изменения скорости.

Характеристикой быстроты изменения скорости является особая величина, называемая ускорением. Чем быстрее изменяется скорость движения, тем больше величина ускорения.

Обозначим начальную скорость переменного движения тела $v_0$, а скорость его через $t$ сек. $v_t$; тогда изменение скорости за этот промежуток времени равно $v_t - v_0$. Допустим, что скорость движения изменяется равномерно; тогда изменение скорости за одну секунду будет равно: $\frac{v_t - v_0}{t}$.

***Величина, измеряемая отношением изменения скорости к тому промежутку времени, за которое это изменение произошло, называется ускорением.***

Обозначив ускорение буквой $a$, мы можем написать:

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

Пусть, например, в некоторый момент времени скорость пули в стволе винтовки была $100\,\frac{м}{сек}$, а через 0,0014 сек. стала $800\frac{м}{сек}$. Значит, за 0,0014 сек. скорость пули изменилась на $800\frac{м}{сек} - 100\frac{м}{сек} = 700\,\frac{м}{сек}$. Ускорение движения пули внутри ствола винтовки будет равно:

$$\frac{700\frac{м}{сек}}{0{,}0014\,сек} = \frac{500\,000\frac{м}{сек}}{сек},\text{ или } 500\,000\frac{м}{сек} \text{ за секунду.}$$

Мы узнали, что ускорение движения пули внутри ствола $500\,000\,\frac{м}{сек}$ за секунду. Как это надо представлять себе? Это надо представлять так, что при равномерном нарастании скорость пули за 1 сек. увеличилась бы на $500\,000\frac{м}{сек}$. Конечно, это не значит, что пуля внутри ствола на самом деле будет двигаться 1 сек.

**20. Единица ускорения.** Установим теперь единицу ускорения. Положив $v_t - v_0 = 1$ ед. скорости и $t = 1$ ед. времени в формуле $a = \frac{v_t - v_0}{t}$, получим $a = 1$ ед. ускорения.

Это значит, что *единицей ускорения является ускорение такого движения, при котором за единицу времени скорость изменяется на единицу скорости.*

Если измерять скорость в $\frac{см}{сек}$, а время в секундах, то единицей ускорения будет ускорение такого движения, в котором за 1 сек. скорость изменяется на $1\frac{см}{сек}$. Наименование такой единицы ускорения: $1\frac{см}{сек^2}$.



Приняв за единицу скорости $1\frac{м}{сек}$, а за единицу времени 1 сек., мы получим единицу ускорения $1\frac{м}{сек^2}$.

$$1\,\frac{м}{сек^2} = 1\,\frac{100\,см}{сек^2} = 100\,\frac{см}{сек^2}.$$

Этими двумя единицами чаще всего и измеряют ускорение, но, вообще говоря, за единицу ускорения можно принимать $1\,\frac{м}{мин^2}$, $1\,\frac{км}{мин^2}$, $1\,\frac{м}{час^2}$ и т. д.

Численное значение ускорения, как и любой другой физической величины, зависит от выбора единиц измерения.

Пример. Ускорение некоторого движения равно $36\frac{м}{сек^2}$. Выразить это ускорение в $\frac{см}{сек^2}$.

$$a = 36\,\frac{100\,см}{сек^2} = 3600\,\frac{см}{сек^2}.$$

*Упражнение 14.*

1. Скорость автомобиля за 1,5 мин. движения возросла от 0 до 60 $\frac{км}{час}$. Найти ускорение автомобиля в $\frac{м}{сек^2}$, в $\frac{см}{сек^2}$.

2. На рисунке 13 изображён график изменения скорости автомобиля, записанный по показаниям спидометра. Определить по этому графику среднее ускорение движения за промежуток времени: 1) от 0 до 5 мин.; 2) от 5 до 20 мин.; 3) от 20 до 25 мин.; 4) от 25 до 35 мин.; 5) от 35 до 40 мин.

**21. Равноускоренное движение.** Познакомимся с ускоренным движением на опыте. Установим наклонно жёлоб и предоставим шарику скатываться по нему. Определим пройденные шариком пути за одну, две, три и т. д. секунды. На рисунке 34 положения шарика на жёлобе в конце каждой из этих секунд обозначены флажками и помечены буквами $a_1$,

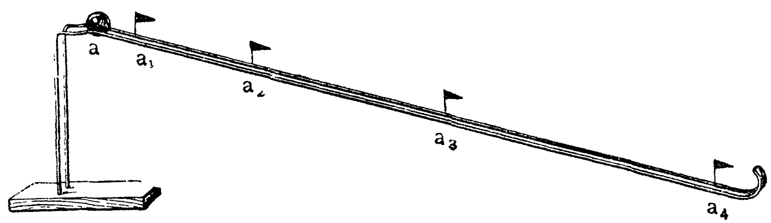



Рис. 34. Положения шарика через равные промежутки времени при его движении по наклонному жёлобу (отмечены флажками).

$a_2$, $a_3$. Расстояние $aa_1$ есть путь, пройденный шариком в течение первой секунды, $a_1a_2$ — путь, пройденный шариком в течение второй секунды, $a_2a_3$ — в течение третьей секунды и $a_3a_4$ — в течение четвёртой секунды. Эти расстояния постепенно увеличиваются, следовательно, скорость шарика в течение всего его движения по наклонному жёлобу возрастала.

Чтобы установить закон возрастания скорости, измерим мгновенные скорости, которые будет иметь центр шарика в конце первой, второй, третьей и т. д. секунды.

Для этого от нижнего конца наклонного жёлоба вверх по нему (рис. 35) отложим расстояния $oa_1$, $oa_2$ и $oa_3$, проходимые шариком за одну, две, три секунды, и будем скатывать шарик сначала от $a_1$, затем от $a_2$ и, наконец, от $a_3$.

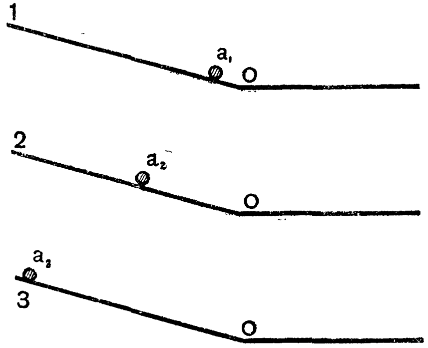



Рис. 35. К установлению закона изменения скорости при движении шарика по наклонному жёлобу.

Скатившись с наклонного жёлоба, шарик будет двигаться с разными скоростями, причём во всех случаях на некотором отрезке горизонтального пути движение шарика будет равномерным.

Измерив в каждом случае путь, пройденный шариком по горизонтальной плоскости за 1 сек., мы найдём скорость шарика на участке равномерного движения, т. е. его мгновенную скорость в точке $o$.

В одном из опытов были получены следующие численные значения мгновенных скоростей шарика:

$$v_1 = 20\frac{см}{сек};\quad v_2 = 40\frac{см}{сек};\quad v_3 = 60\frac{см}{сек};\quad v_4 = 80\frac{см}{сек}.$$

В этом опыте скорость движения шарика по наклонному жёлобу увеличивалась за 1 сек. на одну и ту же величину $\left(\text{на } 20\frac{см}{сек}\right)$, т. е. шарик двигался с ускорением $20\frac{см}{сек}$.

*Движение, при котором в любые равные промежутки времени скорость увеличивается на одну и ту же величину, называется равноускоренным.*

Движение шарика по наклонному жёлобу есть равноускоренное движение.

Равноускоренное движение является одним из простейших видов ускоренных движений. Для равноускоренного движения, как мы увидим, зависимость скорости и пути от времени можно выразить простыми математическими формулами.



***Упражнение 15.***

1. Как назвать движения, при которых ускорение постоянно? равно нулю?

2. Санки, скатываясь с горы, движутся равноускоренно и в конце третьей секунды от начала движения имеют скорость $10{,}8\frac{км}{час}$. Определить, с каким ускорением движутся санки.

3. Предположим, что в опыте, схематически изображённом на рисунке 35, промежутки времени равнялись 0,5 сек. Определить мгновенные скорости шарика в этом случае в конце первого, второго и третьего промежутков времени.

4. Прибор отсчитывает промежутки времени, равные 0,75 сек. Шарик скатывается с наклонного жёлоба в течение трёх таких промежутков времени. Скатившись с наклонного жёлоба, он продолжает двигаться по горизонтальному жёлобу и проходит в течение первого промежутка времени 45 *см*. Определить мгновенную скорость шарика в конце наклонного жёлоба и ускорение шарика при движении по этому жёлобу.

5. Отходя от станции, поезд движется равноускоренно с ускорением $5\frac{см}{сек^2}$. По прошествии какого времени поезд приобретёт скорость $36\frac{км}{час}$?

**22. Скорость равноускоренного движения.** В равноускоренном движении ускорение на всём протяжении пути не меняется, поэтому ***равноускоренное движение есть движение с постоянным ускорением.***

Скорость в равноускоренном движении каждую секунду увеличивается на одну и ту же величину, численно равную ускорению.

Рассмотрим, как можно рассчитать скорость равноускоренного движения в конце какого-нибудь промежутка времени, если известны начальная скорость и ускорение.

Пусть в начале наблюдения скорость тела, например поезда, равна $v_0\frac{м}{сек}$ и поезд движется с ускорением $a\frac{м}{сек^2}$.

Чему будет равна скорость поезда через $t$ секунд?

Нам уже известно, что ускорение равноускоренного движения показывает, на сколько возрастает скорость за каждую секунду.

В нашем примере ускорение равно $a\frac{м}{сек^2}$. Значит, скорость поезда ежесекундно возрастает на $a\frac{м}{сек}$, а в течение $t$ секунд скорость возрастёт на величину, в $t$ раз большую, т. е. на $at\frac{м}{сек}$.

Так как в начале наблюдения скорость поезда была равна $v_0\frac{м}{сек}$ и через $t$ сек она возросла на $at\frac{м}{сек}$, то в конце промежутка времени $t$ она будет равна $(v_0 + at)\frac{м}{сек}$.

Если обозначить скорость тела в конце промежутка времени $t$ через $v_t$, то можно написать:

$$v_t = (v_0 + at)\frac{м}{сек}.$$

Что изменится, если начальная скорость будет равной, например, $v_0 \frac{см}{сек}$ и ускорение $a \frac{см}{сек^2}$ или соответственно $v_0 \frac{км}{сек}$ и $a \frac{км}{сек^2}$?

Рассуждая по-прежнему, мы получим:

$$v_t = (v_0 + at)\frac{см}{сек}$$

или

$$v_t = (v_0 + at)\frac{км}{сек}.$$

Таким образом, алгебраическое выражение для конечной скорости остаётся без изменения. Изменяется только наименование скорости.

Следовательно, конечная скорость равноускоренного движения может быть рассчитана по формуле:

$$v_t = v_0 + at. \qquad (1)$$

В этой формуле $v_0$—начальная скорость, $a$ — ускорение и $t$—время.

Тот же результат можем получить алгебраически из формулы:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}, \qquad (2)$$

о которой говорится в параграфе 19.

Эта формула представляет собой уравнение первой степени. Решим его относительно $v_t$:

$$at = v_t - v_0;$$

отсюда

$$v_t = v_0 + at.$$

Для равноускоренного движения, которое начинается из состояния покоя, $v_0 = 0$, поэтому из формулы (1) получим:

$$v_t = at. \qquad (3)$$

Значит, если начальная скорость равна нулю, то ***мгновенная скорость равноускоренного движения пропорциональна времени.***

Пользуясь формулой (3), можно значение вычисленных в опыте § 21 скоростей представить в виде следующей таблицы:

| | |
|---|---|
| $v_1 = 20\frac{см}{сек^2} \cdot 1\ сек = 20\frac{см}{сек}$ | $v_3 = 20\frac{см}{сек^2} \cdot 3\ сек = 60\frac{см}{сек}$ |
| $v_2 = 20\frac{см}{сек^2} \cdot 2\ сек = 40\frac{см}{сек}$ | $v_4 = 20\frac{см}{сек^2} \cdot 4\ сек = 80\frac{см}{сек}$ |



Из этой таблицы видно, что скорость движения шарика по наклонному жёлобу в любой момент времени может быть рассчитана по формуле:

$$v_t = at.$$

***Упражнение 16.***

1. При отправлении поезда от станции его скорость в течение первых 4 сек. возросла до $0{,}2\frac{м}{сек}$, в течение следующих 6 сек. ещё на $30\frac{см}{сек}$ и за следующие 10 сек. на $1{,}8\frac{км}{час}$. Как двигался поезд в течение этих 20 сек.?

2. Санки, скатываясь с горы, движутся равноускоренно. На некотором участке пути скорость санок в течение 4 сек. возросла от $0{,}8\frac{м}{сек}$ до $14{,}4\frac{км}{час}$. Определить ускорение санок.

3. Велосипедист начинает двигаться с ускорением $20\frac{см}{сек^2}$. По истечении какого времени скорость велосипедиста будет равна $7{,}2\frac{км}{час}$?

**23. График скорости равноускоренного движения.** Зависимость скорости равноускоренного движения от времени можно выразить не только алгебраически, но и графически. Для этого возьмём две взаимно перпендикулярные оси координат (рис. 36). Одну из них $Ov$ назовём осью скоростей, а другую $Ot$— осью времён. Перпендикуляр, опущенный из любой какой-нибудь точки $A$ на ось времён, отсекает на ней отрезок $OB$, численно равный (в выбранном масштабе) некоторому промежутку времени $t$, а перпендикуляр, опущенный из той же точки на ось скоростей, отсекает отрезок $OC$, равный по величине скорости в конце этого промежутка времени.

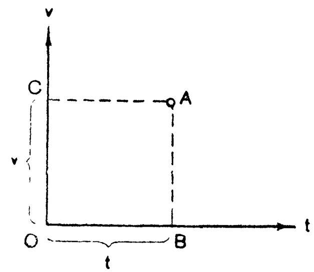



Рис. 36. Оси координат (ось времён и ось скоростей).

Из построения видно, что расстояние $AB$ определяет величину скорости в момент времени $t$.

Построим сначала график движения без начальной скорости. Пусть, например, ускорение $a = 1{,}5\frac{м}{сек^2}$. По формуле $v_t = at$ рассчитаем скорость в конце первой секунды от начала движения, второй, третьей и т. д. и результаты запишем в таблицу.

Начертим оси координат $Ov$ и $Ot$ (рис. 37). На оси времён отложим равные отрезки *0—1, 1—2, 2—3* и т. д., каждый из которых соответствует 1 секунде.

Из концов этих отрезков по данным нашей таблицы $\left(\text{в масштабе } 1\ см - 1\frac{м}{сек}\right)$ отложим мгновенные скорости в конце первой секунды, второй и т. д. Верхние концы $A$, $B$, $C$ полученных отрезков соединим. Получим прямую, проходящую через начало координат и наклонённую к осям. Эта прямая и будет представлять собой график скорости равноускоренного движения.

| $t$ сек. | $v\ \frac{м}{сек}$ |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 1,5 |
| 2 | 3,0 |
| 3 | 4,5 |
| 4 | 6,0 |
| 5 | 7,5 |

График скорости равноускоренного движения имеет такой же вид, как и полученный нами ранее график пути равномерного движения (рис. 17). В обоих случаях график представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Это

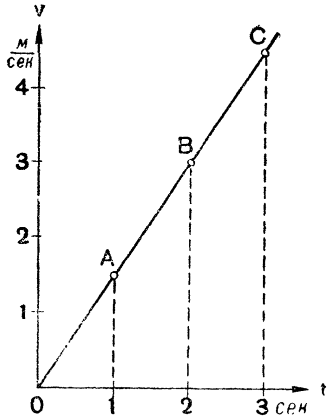



Рис. 37. График скорости равноускоренного движения с начальной скоростью, равной нулю.

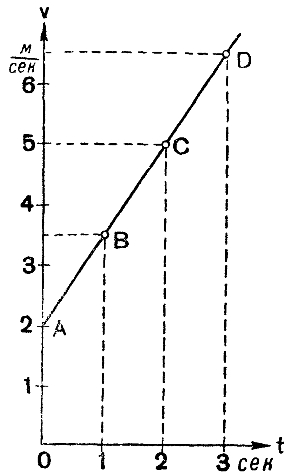



Рис. 38. График скорости равноускоренного движения с начальной скоростью, не равной нулю.

не случайное совпадение. Дело в том, что пройденный путь при равномерном движении и скорость при равноускоренном движении изменяются по одному и тому же закону—прямо пропорционально времени. Закон же прямой пропорциональности, как это доказывается в математике, графически изображается прямой линией.

Построим теперь график для случая, когда начальная скорость не равна нулю, например $v_0 = 2\frac{м}{сек}$ и $a = 1{,}5\frac{м}{сек}$. Так же, как и в первом случае, но теперь по формуле $v_t = v_0 + at$ рассчитаем скорость в конце первой секунды от начального момента отсчёта, в конце второй, третьей и т. д. Результаты запишем в таблицу.

| $t$ сек. | $v\ \frac{м}{сек}$ |
|---|---|
| 0 | 2,0 |
| 1 | 3,5 |
| 2 | 5,0 |
| 3 | 6,5 |
| 4 | 8,0 |
| 5 | 9,5 |
| и т. д. | и т. д. |

Отмечая соответствующие точки на графике и соединяя их между собой линией, получим график скорости равноускоренного движения с начальной скоростью (рис. 38). Так как скорость увеличивается в каждую секунду на одну и ту же величину, то линия, соединяющая точки $A$, $B$, $C$, $D$,—прямая, но она не проходит через точку пересечения осей, так как в момент $t = 0$ скорость тела не равняется нулю.

***Упражнение 17.***

На рисунке 39 даны на одном чертеже два графика скорости. Пользуясь масштабом, указанным на рисунке, определить ускорения движений.

**24. Графический способ вывода формулы пути равноускоренного движения.** В равномерном движении пройденный путь графически изображался площадью прямоугольника, построенного на графике скорости (§ 11). В равноускоренном же

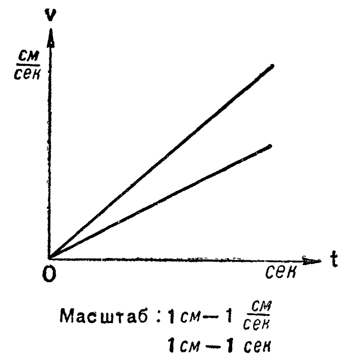



Рис. 39. К упражнению 1.

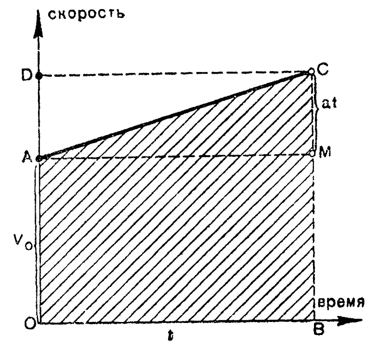



Рис. 40. К выводу формулы пути, пройденного при равноускоренном движении.

движении с начальной скоростью пройденный путь изображается площадью трапеции. Это мы используем для вывода формулы пути равноускоренного движения.

На рисунке 40 график скорости равноускоренного движения изображён прямой $AC$. Путь, пройденный за время $t$, на том же рисунке изображается площадью $OACB$; он численно равен площади $OACB$. Эта площадь ограничена отрезком прямой $AC$, представляющим собой график скорости, отрезками $OB = t$, $OA = v_0$, $BC = v_t$.

Из рисунка 40 видно, что если к площади прямоугольника $OAMB$ прибавить площадь треугольника $ACM$, то мы получим площадь $S$ фигуры $OACB$. Таким образом,

$$S = OA \cdot OB + \frac{1}{2} CM \cdot AM.$$

Но $OB = AM = t$, $OA = BM = v_0$, $CM = BC - BM = v_t - v_0 = v_0 + at - v_0 = at$. Отсюда для пройденного пути получим формулу:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} \cdot at \cdot t, \quad \text{или} \quad s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Для движения без начальной скорости $(v_0 = 0)$ пройденный путь выразится формулой:

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

По формуле $s = \frac{at^2}{2}$ рассчитаем пройденные пути при равноускоренном движении за 1, 2, 3 и т. д. секунды для случая, когда ускорение равно $a \frac{м}{сек^2}$, и полученные данные запишем в таблицу.

| $t$ сек. | $s$ м |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | $\frac{a}{2} \cdot 1$ |
| 2 | $\frac{a}{2} \cdot 4$ |
| 3 | $\frac{a}{2} \cdot 9$ |
| 4 | $\frac{a}{2} \cdot 16$ |
| 5 | $\frac{a}{2} \cdot 25$ |

Из этой таблицы видно, что за две секунды тело пройдёт путь, в 4 раза больший, чем за первую секунду, за три секунды—в 9 раз больший и т. д., т.е. ***при равноускоренном движении без начальной скорости пройденный путь пропорционален квадрату времени.***

Из формулы $s = \frac{at^2}{2}$ и из приведённой таблицы следует, что *путь, проходимый телом в первую секунду, численно равен половине ускорения*. Если, например, поезд, двигаясь от станции, в первую секунду прошёл путь 1,5 *м*, то ускорение движения его $3 \frac{м}{сек^2}$.

**24а. Средняя скорость равноускоренного движения.** Из формулы пути равноускоренного движения легко вывести формулу средней скорости.

Из определения средней скорости следует (см. § 17), что $v_{ср.} = \frac{s}{t}$ или

$v_{ср.} = \dfrac{v_0 t + \frac{at^2}{2}}{t}$; разделив каждое слагаемое числителя на $t$, получим:

$$v_{ср.} = v_0 + \frac{at}{2},$$



а преобразуя правую часть написанного равенства, будем иметь:

$$v_{ср.} = \frac{2v_0 + at}{2}, \quad \text{или} \quad v_{ср.} = \frac{v_0 + v_0 + at}{2}.$$

Так как $v_0 + at = v_t$, то получим:

$$v_{ср.} = \frac{v_0 + v_t}{2}.$$

Итак, ***средняя скорость равноускоренного движения за некоторый промежуток времени равна полусумме начальной и конечной скоростей.***

Для случая, когда $v_0 = 0$, $v_{ср.} = \frac{v_t}{2}$.

В равноускоренном движении скорость движения изменяется равномерно от $v_0$ до $v_t$. Поэтому средняя скорость такого движения равна среднему арифметическому начальной и конечной скоростей:

$$v_{ср.} = \frac{v_0 + v_t}{2}.$$

**24б. Уравнения равноускоренного движения.** Формулы

$$v_t = v_0 + at \tag{1}$$

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \tag{2}$$

называются уравнениями равноускоренного движения; они выражают зависимость скорости или пути в этом движении от времени.

Этих формул вполне достаточно для решения любой задачи на равноускоренное движение. Однако для упрощения расчётов в задачах, где не дано времени движения, целесообразно пользоваться ещё одной формулой.

Из формулы ускорения (§ 19) время $t = \frac{v_t - v_0}{a}$. Подставив его формулу $s = v_{ср.} t$, получим:

$$s = v_{ср.} \cdot \frac{v_t - v_0}{a}.$$

Заменяя $v_{ср.}$ её значением $\frac{v_t + v_0}{2}$ и преобразуя полученное выражение, придём к формуле:

$$s = \frac{v_t + v_0}{2} \cdot \frac{v_t - v_0}{a},$$

откуда

$$s = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2a} \tag{3}$$

или

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as. \tag{4}$$

Если начальная скорость равна нулю: $v_0=0$, то полученная формула (4) примет вид:

$$v_t^2=2as,$$

или

$$v_t=\sqrt{2as}. \qquad (5)$$

Формулами (4) и (5) часто пользуются для решения задач, когда не дано времени движения.

**25. Пути, проходимые в равноускоренном движении за равные последовательные промежутки времени.** Воспользуемся таблицей пройденных путей, приведённой на странице 43, и определим пути, проходимые телом в равноускоренном движении без начальной скорости за каждую отдельную секунду.

Пройденный путь за первую секунду от начала движения равен $\frac{a}{2}\cdot 1$. Обозначим его $s_1$:

$$s_1=\frac{a}{2}\cdot 1.$$

Чтобы вычислить путь $s_2$ за вторую секунду, надо из пути, пройденного за две секунды, вычесть путь, пройденный за первую секунду:

$$s_2=\frac{a}{2}\cdot 4-\frac{a}{2}\cdot 1=\frac{a}{2}(4-1)=\frac{a}{2}\cdot 3.$$

Пройденный путь $s_3$ за третью секунду найдём, вычитая из пути, пройденного за три секунды, путь, пройденный за две секунды:

$$s_3=\frac{a}{2}\cdot 9-\frac{a}{2}\cdot 4=\frac{a}{2}(9-4)=\frac{a}{2}\cdot 5.$$

Таким же образом найдём, что пути $s_4, s_5$, пройденные за четвёртую и пятую секунды, будут равны:

$$s_4=\frac{a}{2}\cdot 16-\frac{a}{2}\cdot 9=\frac{a}{2}(16-9)=\frac{a}{2}\cdot 7.$$

$$s_5=\frac{a}{2}\cdot 25-\frac{a}{2}\cdot 16=\frac{a}{2}(25-16)=\frac{a}{2}\cdot 9.$$

Составим отношение из числовых значений пройденных путей:

$$s_1:s_2:s_3:s_4:s_5=\frac{a}{2}\cdot 1:\frac{a}{2}\cdot 3:\frac{a}{2}\cdot 5:\frac{a}{2}\cdot 7:\frac{a}{2}\cdot 9.$$

Преобразуя правую часть равенства, получим:

$$s_1:s_2:s_3:s_4:s_5=1:3:5:7:9.$$

Из полученного нами равенства видно, что *пути, проходимые в последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательный ряд нечётных чисел.*



**Историческая справка.** Законы равноускоренного движения были установлены итальянским учёным Галилео Галилеем на основе опытов по изучению движения шарика по наклонной плоскости.

Ниже приводится выписка из сочинения Галилея, опубликованного впервые в 1638 г., незадолго до смерти Галилея. В этом сочинении описываются исследования движения тела, скатывающегося по наклонной плоскости.

## ИЗ СОЧИНЕНИЯ ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЯ

*„Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению“.*

„Вдоль узкой стороны линейки, или, лучше сказать, деревянной доски, длиной около двенадцати локтей[1], шириной пол-локтя и толщиной около трёх дюймов, был прорезан канал, шириной немного больше одного дюйма. Канал этот был прорезан совершенно прямым и, чтобы сделать его достаточно гладким и скользким, оклеен внутри возможно ровным и полированным пергаментом; по этому каналу мы заставляли падать гладкий шарик из твердейшей бронзы совершенно правильной формы. Установив изготовленную таким образом доску, мы поднимали конец её над горизонтальной плоскостью, когда на один, когда на два локтя, и заставляли скользить шарик по каналу (описанному выше), отмечая способом, о котором речь будет идти ниже, время, необходимое для пробега им всего пути. Повторяя много раз один и тот же опыт, чтобы точно определить время, мы не находили никакой разницы даже на одну десятую времени биения пульса. Точно установив это обстоятельство, мы заставляли шарик проходить лишь четвёртую часть длины того же канала; измерив время его падения, мы всегда находили самым точным образом, что оно равняется всего половине того, которое наблюдалось в первом случае. Произведя далее опыты при различной иной длине пути, сравнивая время прохождения всей линейки со временем прохождения половины, двух третей, трёх четвертей или любых иных частей её и повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения при всех наклонах плоскости, т. е. канала, по которому скользил шарик. При этом мы наблюдали также, что промежутки времени пробега пути при различных наклонах относятся между собой именно так, как утверждает и доказывает далее автор[2].

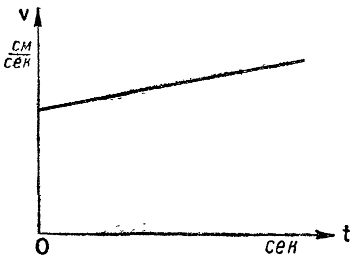
Что касается способа измерения времени, то мы пользовались большим ведром, наполненным водой и подвешенным наверху; в дне ведра был проделан узкий канал; через этот последний вода изливалась тонкой струйкой и собиралась в маленьком бокале в течение всего того времени, как шарик спускался по всему каналу, или части его; собранные таким образом количества воды каждый раз взвешивались на точнейших весах; разность и от-

[1] *Локоть*—старинная мера длины; русский локоть равняется 46,72 *см.*
[2] Сочинение Галилея изложено в виде разговора трёх лиц. Приводимый отрывок излагает один из собеседников (Сальвиати), передавая содержание статьи, написанной Галилеем, которого он называет „автором“.

ношение веса воды для разных случаев давали нам разность и отношение времён падения, и притом с такой точностью, что, как я уже упоминал, повторяя один опыт много и много раз, мы не могли заметить сколько-нибудь значительных отклонений".

*Упражнение 18.*

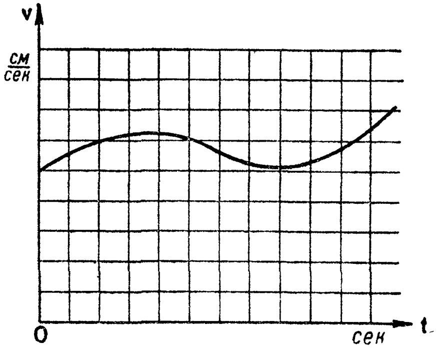
1. На рисунке 41 дан график скорости некоторого равноускоренного движения. Пользуясь масштабом, данным на рисунке, определить путь, проходимый в этом движении в течение 3,5 сек.




Масштаб: 1 *см* — 1 $\frac{см}{сек}$

1 *см* — 1 *сек*

Рис. 41.




Масштаб: длина стороны клетки — 1 *сек* — 1 $\frac{м}{сек}$

Рис. 42.

2. На рисунке 42 изображён график скорости некоторого переменного движения. Перечертите рисунок в тетрадь и обозначьте штриховкой площадь, численно равную пути, проходимому в течение 3 сек. Чему примерно равен этот путь?

3. В течение первого промежутка времени от начала равноускоренного движения шарик проходит по жёлобу 8 *см*. Какое расстояние пройдёт шарик в течение трёх таких же промежутков, прошедших от начала движения?

4. В течение 10 равных промежутков времени от начала движения тело, двигаясь равноускоренно, прошло 75 *см*. Сколько сантиметров прошло это тело в течение двух первых таких же промежутков времени?

5. Поезд, отходя от станции, движется равноускоренно и в течение двух первых секунд проходит 12 *см*. Какое расстояние пройдёт поезд в течение 1 мин., считая от начала движения?

Примечание. Задачи 3, 4, 5 решать, не прибегая к формулам, но хорошо усвоив всё, о чём говорится в § 24.

6. Поезд, отходя от станции, движется равноускоренно с ускорением $5\ \frac{см}{сек^2}$. Сколько времени потребуется для развития скорости $28{,}8\ \frac{км}{час}$ и какое расстояние пройдёт поезд за это время?

7. Паровоз по горизонтальному пути подходит к уклону со скоростью $8\ \frac{м}{сек}$, затем движется вниз по уклону с ускорением $0{,}2\ \frac{м}{сек^2}$. Определить длину уклона, если паровоз проходит его за 30 сек.



8. Начальная скорость тележки, движущейся вниз по наклонной доске, равна $10\ \frac{см}{сек}$. Всю длину доски, равную 2 *м*, тележка прошла в течение 5 сек. Определить ускорение движения тележки.

9. Пуля вылетает из ствола ружья со скоростью $800\ \frac{м}{сек}$. Длина ствола 64 *см*. Предполагая движение пули внутри ствола равноускоренным, определить ускорение и время движения.

**26. Свободное падение тел.** Одним из интересных и важных видов движения является движение падающих тел. Изучим это движение на опыте.

Подвесим на нити какое-нибудь тяжёлое тело (рис. 43), нить натянется вдоль определённого направления. Это направление, как известно, называется вертикальным или отвесным, а нить с грузом—отвесом.

Если пережечь нить, тело будет падать по вертикальному направлению.

Выпустим из рук с одинаковой высоты одновременно плашмя металлический кружок и такого же диаметра лёгкий картонный кружок. Мы увидим, что скорее упадёт металлический кружок. Почему? Не является ли причиной этого различие в весе падающих тел?

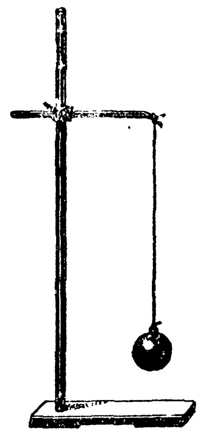


Рис. 43. Тело, подвешенное на нити, натягивает нить по вертикали.

Такой вывод легко опровергается следующим опытом. Возьмём два одинаковых листа бумаги и, скомкав один из них, уроним оба листа с одинаковой высоты. Мы увидим, что скомканный лист упадёт быстрее. Следовательно, причиной различной скорости падения тел является не только различие в весе тел.

Положим картонный кружок на металлический и выпустим их из рук. Оба кружка упадут в одно и то же время. Этот опыт отличается от первого тем, что условия падения кружков здесь неодинаковы. Металлический кружок, падая, встречает сопротивление воздуха, между тем как для картонного кружка этого препятствия нет: оно устраняется металлическим кружком, падающим впереди картонного. Следовательно, на скорость падения тел влияет сопротивление воздуха.

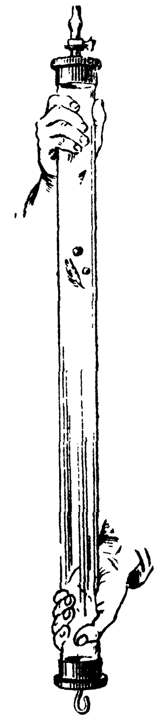


Рис. 44.

Рассмотрим теперь, как будут падать тела в отсутствие сопротивления воздуха, в безвоздушном пространстве.

Возьмём стеклянную трубку длиной примерно 1,5 *м* с одним закрытым концом и с краном на другом конце (рис. 44). В трубку вложены: монета, птичье пёрышко, кусочек пробки, дробинка, т. е. тела разной формы и разного веса. Пока в трубке имеется воздух, упомянутые тела при перевёртывании трубки движутся с разными скоростями. Но стоит только откачать воздух из трубки, и те же тела будут двигаться с одинаковыми скоростями.

*Падение тел в безвоздушном пространстве называется свободным падением.*

**Галилео Галилей** (1564—1642)—великий итальянский учёный, основатель опытной физики.

Галилей открыл законы падения тел и качания маятника, ему принадлежит идея закона инерции, включённого Ньютоном в число основных законов механики. Галилей изобрёл термометр, первый применил телескоп для астрономических исследований, открыл спутников Юпитера, солнечные пятна и фазы Венеры.

Галилей был ревностным пропагандистом взглядов Коперника, за что был судим судом папской инквизиции и под угрозой пыток вынужден был подписать отказ от своих убеждений. Однако на деле он остался верен им и до конца жизни продолжал развивать учение о гелиоцентрической системе мира.

Падение тел опытным путём впервые изучал в конце XVI в. Галилей, роняя тяжёлые тела с башни (рис. 45). Эти опыты показали, что все тела, независимо от их веса, достигали поверхности земли почти в одно и то же время.

Законы падения Галилей открыл, изучая движение шарика по наклонному жёлобу. Это движение является тоже падением, только протекающим медленнее, чем падение по вертикали.

Исследования Галилея показали, что ***свободное падение есть движение равноускоренное.***

Особенностью свободного падения является то, что ***все тела в данном месте падают с одинаковым ускорением. Это ускорение называется ускорением свободного падения.***

Ускорение свободного падения обозначается буквой $g$ (первая буква латинского слова г р а в и т а с, что значит тяжесть).

Так как движение свободно падающего тела есть равноускоренное движение без начальной скорости, то расчёты



пути и скорости в этом движении производятся по формулам, выведенным в § 22 и 24.

Так, если тело падает с высоты $h$ в течение времени $t$, то

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

При этом тело достигает скорости

$$v = gt \text{ или } v = \sqrt{2gh}.$$

Величину $g$ можно определить опытным путём, например заставляя стальной шарик падать с определённой высоты и

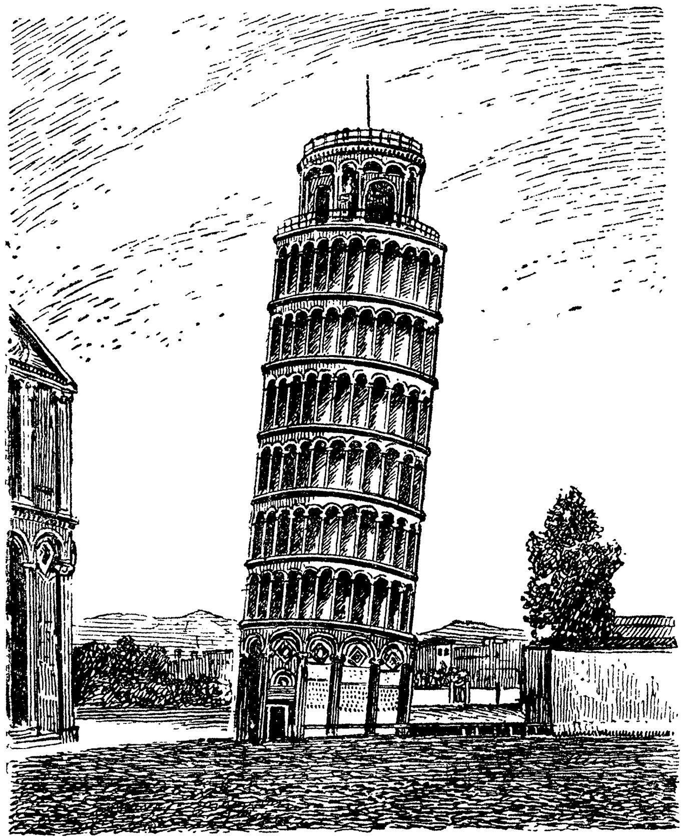


Рис. 45. Наклонная башня, которой пользовался Галилей для изучения законов падения тел.

измеряя время падения. Сопротивление воздуха, которое испытывает при этом шарик, незначительно.

При проведении одного такого опыта в пролёте школьной лестницы с высоты 17,6 *м* падал стальной шарик. Секундомер показал время падения 1,9 сек. По формуле $g=\frac{2h}{t^2}$ нашли, что $g\approx 9{,}8\ \frac{м}{сек^2}$.

Существуют, конечно, способы, позволяющие определить величину $g$ значительно точнее, чем мы это делали в школе.

Численное значение $g$ на разных широтах земного шара различно и колеблется между $983{,}24\frac{см}{сек^2}$ на полюсах и $978{,}05\frac{см}{сек^2}$ на экваторе; для Москвы $g=981{,}56\frac{см}{сек^2}$.

Ускорение свободного падения $g=980{,}665\frac{см}{сек^2}$ называют нормальным.

Причины, вызывающие различие в ускорениях свободного падения тел, будут рассмотрены далее.

В расчётах, если не требуется особой точности, пользуются значением $g$, равным $980\frac{см}{сек^2}$, или $9{,}8\frac{м}{сек^2}$, или даже $10\frac{м}{сек^2}$.

*Упражнение 19.*

1. Определить глубину колодца, если камень, упавший в него, коснулся дна колодца через 2 сек.

2. Со стола высотой 80 *см* на пол падает карандаш. Определить время падения.

3. Тело падает с высоты 30 *м*. Какое расстояние оно проходит в течение последней секунды своего падения?

4. Два тела падают с разной высоты, но достигают земли в один и тот же момент времени; при этом первое тело падает 1 сек., а второе —2 сек. На каком расстоянии от земли было второе тело, когда первое начало падать?

5. На рисунке 46 изображена установка, с помощью которой можно на опыте определить ускорение свободного падения тел.

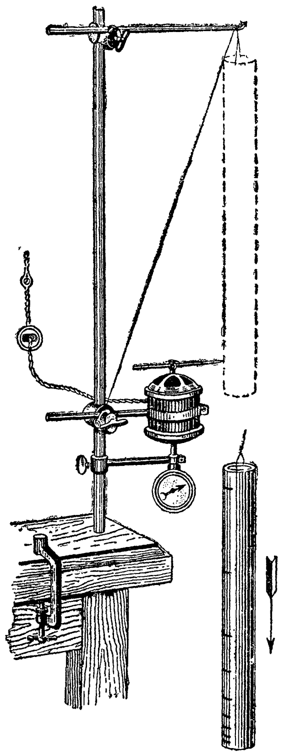


Рис. 46. Установка для изучения свободного падения.

Деревянный цилиндр подвешен на нити. Внизу к штативу прикреплён маленький электродвигатель, делающий, например, 50 оборотов в секунду, а к оси двигателя приделана кисточка, смоченная краской. При работе двигателя кисточка чертит через равные промежутки времени метки на поверхности цилиндра. При падении цилиндра метки на нём окажутся одна над другой, и по расстоянию между ними можно судить о движении



цилиндра во время падения. Опыт начинают с того, что запускают двигатель, а затем пережигают нить, на которой висит цилиндр. Через каждые 0,02 сек. кисточка наносит на падающем цилиндре метки. Измеряют расстояния от начальной метки до первой, второй, третьей и т. д. Эти расстояния дадут пути, пройденные при падении за $\frac{1}{50}$ сек., $\frac{2}{50}$ сек., $\frac{3}{50}$ сек. и т. д.

Расположение меток на цилиндре показано на рисунке 46.

Во второй графе таблицы указаны расстояния от начальной метки до последующих меток на цилиндре, а в первой графе—время падения.

| Время (сек.) | Путь (*см*) | Время (сек.) | Путь (*см*) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,08 | 3,14 |
| 0,02 | 0,20 | 0,10 | 4,90 |
| 0,04 | 0,78 | 0,12 | 7,06 |
| 0,06 | 1,76 | 0,14 | 9,60 |

На основании данных таблицы вычислить среднюю величину ускорения падения цилиндра.

## 27. Равнозамедленное движение.

На рисунке 47 изображено движение шарика от толчка вверх по наклонному жёлобу.

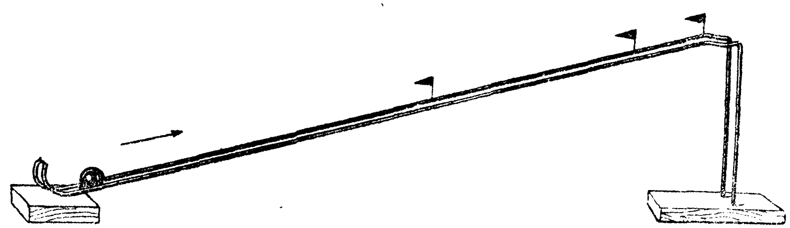


Рис. 47. Движение шарика вверх по наклонному жёлобу.

Флажками отмечены положения шарика через одну, две, три секунды от начала движения. Расстояние между флажками, а следовательно, и пути, проходимые шариком за равные промежутки времени, уменьшаются. Значит, движение шарика замедленное.

Простейшим видом замедленного движения является движение равнозамедленное.

***В равнозамедленном движении скорость за любые равные промежутки времени уменьшается на одну и ту же величину.***

При этом ускорение, вычисляемое по формуле:

$$a=\frac{v_t-v_0}{t}, \qquad (1)$$

окажется отрицательной величиной, так как $v_t$ меньше $v_0$. Пусть, например, скорость поезда при равнозамедленном движении за $t = 10$ сек. уменьшилась с $v_0 = 15 \frac{м}{сек}$ до $v_t = 10 \frac{м}{сек}$; в таком случае ускорение

$$a = \frac{10\frac{м}{сек} - 15\frac{м}{сек}}{10\ сек} = -0{,}5\frac{м}{сек^2}.$$

*Равнозамедленное движение есть движение с постоянным отрицательным ускорением.*

Чтобы получить формулы скорости и пути для равнозамедленного движения, достаточно в аналогичных формулах равноускоренного движения заменить $a$ на $-a$.

Тогда формула скорости будет:

$$v_t = v_0 - at; \qquad (2)$$

для пройденного же пути получим:

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \qquad (3)$$

Равноускоренное и равнозамедленное движения часто называют равнопеременными движениями, так как в обоих этих движениях скорость изменяется равномерно.

Многие движения весьма близки к равнопеременным и при различных расчётах могут быть приняты за равнопеременные. Так, движения поездов и автомобилей при отходе их от остановки и при торможении, движение пули внутри ствола и многие другие могут рассматриваться как равнопеременные.

***Упражнение 20.***

1. Поезд остановился через 20 сек. после начала торможения, пройдя за это время 120 *м*. Определить скорость поезда в момент торможения и ускорение поезда.

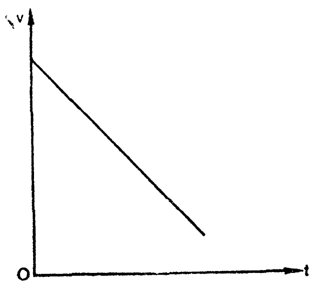



Рис. 48. К упражнению 5.

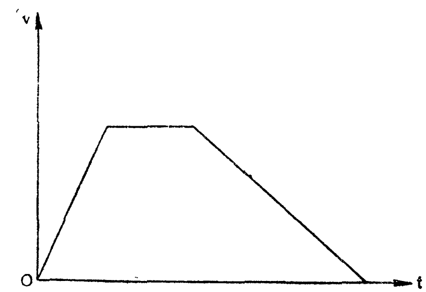



Рис. 49. К упражнению 5.

2. Поезд, идущий со скоростью 18 $\frac{м}{сек}$, затормозили, и он через 15 сек. остановился. Считая движение поезда при торможении равнозамедленным, определить путь, пройденный поездом за эти 15 сек.



3. Построить графики скорости равнозамедленного движения для случаев: 1) $v_0 = 10\frac{м}{сек}$, $a = -1{,}5\frac{м}{сек^2}$; 2) $v_0 = 10\frac{м}{сек}$, $a = -2\frac{м}{сек^2}$.

Масштаб в обоих случаях одинаков: 0,5 *см* — 1 $\frac{м}{сек}$; 0,5 *см* — 1 сек.

Сравнить между собой полученные графики.

4. Изобразить пройденный путь за время $t$ на графике скорости равнозамедленного движения. Принять $v_0 = 10\frac{м}{сек}$, $a = 2\frac{м}{сек^2}$.

5. Описать движения, графики скоростей которых даны на рисунках 48 и 49.

**28. Движение тела, брошенного вертикально вверх.** Примером замедленного движения (очень близкого к равнозамедленному) может служить движение тела, брошенного вертикально вверх.

Действительно всякое тело свободно падает с ускорением $g$, направленным вертикально вниз. Вследствие этого при движении тела вертикально вверх его скорость ежесекундно уменьшается на величину, численно равную ускорению свободного падения. Брошенное вертикально вверх тело движется равнозамедленно до тех пор, пока скорость его не станет равной нулю. В этот момент тело достигает наибольшей высоты и с этой высоты начинает свободно падать, двигаясь обратно вниз.

Формулы для подсчёта скорости и пути движения тела, брошенного вертикально вверх, для любого момента времени будут:

$$v_t = v_0 - gt; \qquad (1)$$

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2} \qquad (2)$$

где $h$ — высота, на которую поднимается тело за время $t$.

Формулу для расчёта высоты $h$ можно также получить, рассматривая движение тела, брошенного вертикально вверх, как сложное движение, состоящее из двух движений: из движения равномерного, направленного вертикально вверх с некоторой начальной скоростью, и из свободного падения. Оба движения происходят по одной прямой; поэтому пройденный телом путь за некоторый промежуток времени будет равен алгебраической сумме путей, пройденных в каждом отдельном движении.

Обозначим скорость, с которой тело брошено вертикально вверх, через $v_0$. Двигаясь только с этой скоростью равномерно, тело за $t$ сек. могло бы подняться на высоту $h_1 = v_0 t$. Но оно одновременно, свободно падая, в течение того же времени $t$ опускается вниз на расстояние $h_2 = \frac{gt^2}{2}$. Действительная высота $h$, на которую поднимается тело вверх за $t$ сек., будет равна $h_1 - h_2$, или:

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть тело брошено вертикально вверх со скоростью $40 \frac{м}{сек}$. Для упрощения расчётов положим $g = 10 \frac{м}{сек^2}$. Определим, на какой высоте будет находиться тело через 3 сек. от начала движения. По формуле (2):

$$h = 40 \frac{м}{сек} \cdot 3 \ сек - \frac{10 \frac{м}{сек^2} \cdot 9 \ сек^2}{2} = 75 \ м.$$

Так как в момент времени, когда тело достигает наибольшей высоты, $v_t = 0$, то время полёта определится из уравнения (1):

$$0 = v_0 - gt, \quad \text{отсюда} \quad t = \frac{v_0}{g}.$$

Чтобы определить наибольшую высоту, на которую поднимается тело, подставим найденную величину $t$ в уравнение (2), определяющее $h$:

$$h = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}; \quad v_0 = \sqrt{2gh}. \tag{3}$$

Найдём теперь, с какой скоростью тело, падая с этой высоты, вернётся к начальному своему положению. Так как тело, падая, будет двигаться равноускоренно без начальной скорости и пройдёт расстояние $h$, то скорость его будет равна:

$$v = \sqrt{2gh} = v_0,$$

т. е. *скорость, с которой тело вернётся в то же место, откуда оно было брошено, равна первоначальной скорости* (если не учитывать сопротивления воздуха).

***Упражнение 21.***

1. Доказать, что время, в течение которого движущееся вертикально вверх тело достигает наибольшей высоты $h$, равно времени, в течение которого тело падает с этой высоты.

2. Тело движется вертикально вниз с начальной скоростью. На какие простейшие движения можно разложить такое движение тела? Написать формулы для скорости и пройденного пути этого движения.



3. Тело брошено вертикально вверх со скоростью $40 \frac{м}{сек}$. Вычислить, на какой высоте будет тело через 2 сек., 6 сек., 8 сек. и 9 сек., считая от начала движения. Ответы объяснить. Для упрощения расчётов принять $g$ равным $10 \frac{м}{сек^2}$.

4. С какой скоростью надо бросить тело вертикально вверх, чтобы оно вернулось назад через 10 сек.?

5. Стрела пущена вертикально вверх с начальной скоростью $40 \frac{м}{сек}$. Через сколько секунд она упадёт обратно на землю? Для упрощения расчётов принять $g$ равным $10 \frac{м}{сек^2}$.

6. Аэростат равномерно поднимается вертикально вверх со скоростью $4 \frac{м}{сек}$. К нему на верёвке подвешен груз. На высоте 217 $м$ верёвка обрывается. Через сколько секунд груз упадёт на землю? Принять $g$ равным $10 \frac{м}{сек^2}$.

# ИНЕРЦИЯ. СИЛА. СЛОЖЕНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ СИЛ

**29. Задача динамики**. В предыдущей главе мы рассматривали различные виды движения, не касаясь вопроса о причинах движения. Отдел механики, в котором изучаются движения тел без исследования причин, их вызывающих, называется кинематикой.

Для конструирования машин и механизмов, управления их движением необходимо знать законы взаимодействия тел, знать причины, вызывающие движения тел, причины, под действием которых возникает изменение скорости тел, т. е. ускорение. Отдел механики, в котором изучаются связи между движениями и причинами, их вызывающими, называется динамикой.

Основоположником динамики является гениальный английский учёный Исаак Ньютон.

В основе динамики лежат три закона, которые представляют собой обобщение многовекового опыта человечества и знаний о различного рода движениях тел.

Эти законы сформулированы Ньютоном и носят его имя.

**30. Первый закон Ньютона (закон инерции)**. Первый закон Ньютона устанавливает, при каких условиях тело будет находиться в покое или двигаться прямолинейно и равномерно.

Наблюдения и опыт показывают нам, что скорость любого тела „сама по себе“ измениться не может.

Футбольный мяч спокойно лежит на поле. Ударом ноги футболист приводит его в движение. Растянутая пружина, сокращаясь, закрывает дверь. Мяч, брошенный вверх, летит, уменьшая свою скорость,—на него действует притяжение Земли. Магнит, действуя на движущийся железный шарик, меняет не только величину его скорости, но и направление её. Движущийся с выключенным мотором автомобиль останавливается вследствие трения колёс о полотно дороги и сопротивления воздуха.

Во всех этих примерах изменение скорости тела происходит в результате действия на это тело каких-либо других тел. В одних случаях это действие проявляется при непосредственном соприкосновении (удар, давление), в других случаях



взаимодействие тел сложнее; например, притяжение тел Землёй, притяжение железного шарика магнитом.

Как же будет двигаться тело, если на него не будут действовать другие тела? Можно ли установить это на опыте?

На простых опытах сделать это трудно вследствие наличия всякого рода сопротивлений, в частности сопротивления воздуха.

**Исаак Ньютон** (1643—1727)— гениальный английский учёный, родился 5 января 1643 г., т. е. через год после смерти Галилея и почти через сто лет после смерти Коперника.

Ньютон сделал величайшие открытия: им открыты законы динамики, лежащие в основе современной механики и носящие его имя, закон всемирного тяготения. Он разработал учение о свете, которым мы пользуемся до настоящего времени. Кроме того, ему принадлежит ряд крупных открытий в области математики.

Главным трудом Ньютона является его книга „Математические начала натуральной философии“[1]. Эта книга сыграла огромную роль в развитии физики; в ней изложены основы механики и даны примеры практического применения законов динамики и закона всемирного тяготения.

Однако можно заметить, что чем полнее устранены помехи движению тела, тем в большей мере движение тела приближается к равномерному и прямолинейному.

Так, например, стальной шарик, скатившись с наклонного жёлоба на горизонтальную поверхность, покрытую песком, быстро останавливается; катясь же по гладкой стеклянной поверхности, шарик долго сохраняет свою скорость.

Автомобиль с выключенным мотором быстро останавливается на булыжной мостовой и довольно долго продолжает двигаться по асфальтированному шоссе.

Естественно допустить, что если бы были устранены все помехи движению, то тело продолжало бы двигаться сколь угодно долго.

Ньютон, обобщая результаты наблюдений и опытов над движением тел, открыл закон, который он положил в основу динамики в качестве её первого закона. Закон этот может быть сформулирован следующим образом:

[1] На современном языке это означает: математические основы физики.

***если на тело не действуют другие тела, то оно сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения.***

Из этого закона следует: *если на тело не действуют другие тела, то оно движется со скоростью, постоянной по величине и направлению.* Покой рассматривается как частный случай движения, когда скорость равна нулю. В обоих этих случаях отсутствует ускорение. Таким образом, *если на данное тело не действуют другие тела, то оно движется без ускорения.*

Свойство тела сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения называется и н е р ц и е й[1] тела. Сформулированный же выше закон Ньютон назвал з а к о н о м и н е р ц и и.

С проявлением инерции тел мы встречаемся постоянно. Всем хорошо известно, что при внезапной остановке вагона стоящие в нём пассажиры, сохраняя своё движение, наклоняются вперёд. При внезапной остановке скачущей лошади всадник, продолжая движение, летит вперёд через её голову.

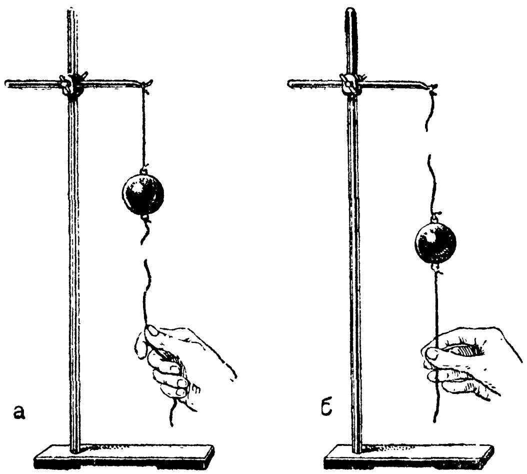


Рис. 50. *а*) При резком рывке обрывается нижняя нитка; *б*) если тянуть медленно, обрывается верхняя нитка.

Вследствие инерции нельзя мгновенно изменить скорость тела, для этого требуется время.

Проделаем следующий опыт. Подвесим тяжёлый груз на такой нитке, которая может выдержать нагрузку, немного бóльшую веса груза. Такую же нитку прикрепим снизу груза. Если за нижнюю нитку дёрнуть резким рывком (рис. 50, *а*), то она оборвётся; если же медленно тянуть за неё, постепенно увеличивая усилие, оборвётся верхняя нитка (рис. 50, *б*). Объясним этот опыт. Для того чтобы оборвалась верхняя нитка, она должна натянуться, т. е. груз должен прийти в движение. При резком рывке рука действует на груз в течение очень малого промежутка времени и груз вследствие

[1] *Инерция*—от латинского слова и н е р ц и а — неподвижность, бездеятельность.



инерции не успевает прийти в движение, поэтому верхняя нитка не обрывается. Действуя же на нижнюю нитку с силой, хотя и недостаточной для её обрыва, но длительно, мы постепенно приводим в движение груз, и поэтому верхняя нитка, которая уже натянута весом груза, натягивается ещё дополнительно и обрывается.

Точно так же для остановки движущегося тела, например автомобиля, трамвая или поезда, требуется время. Невозможно мгновенно остановить ни автомобиль, ни поезд. Даже при сильном торможении некоторое время автомобиль будет двигаться по инерции вперёд. Быстрые остановки автомобиля или поезда не прекратят продолжающегося по инерции движения пассажиров, и это часто бывает причиной несчастных случаев.

Инерцию тел необходимо учитывать и в производстве, где приходится иметь дело с движущимися частями инструментов, станков и машин, которые вследствие инерции нельзя мгновенно привести в движение, как и нельзя мгновенно остановить.

*Инерция—одно из самых общих свойств материи; оно присуще всякому телу, каково бы оно ни было и где бы оно ни находилось.*

***Упражнение 22.***

1. Как объяснить, что споткнувшийся человек падает по направлению движения?
2. На чём основано освобождение одежды от пыли при её выколачивании? при встряхивании?
3. Спрыгивая с некоторой высоты и становясь на землю, человек подгибает ноги в коленях. Почему?
4. Как насаживают топор на топорище? Объясните явление.

**31. Сила.** Первые представления о силе связываются у нас с мускульными напряжениями рук, ног — с мускульной силой. Словами „сильный“, „слабый“ мы в обыденной жизни часто характеризуем действие одного тела на другое, например действие руки на мяч, действие пружины на боёк затвора винтовки, давление пара на поршень паровой машины и т. д.

Понятием силы широко пользуются и в науке, оно принадлежит к числу основных понятий физики. Содержание, которое вкладывается в это понятие в механике, по существу не расходится и с нашими обыденными представлениями о силе. Рассмотрим это подробнее.

Из закона инерции следует, что изменение скорости тела по величине и направлению происходит в результате действия на это тело каких-либо других тел. Но изменение скорости характеризуется ускорением. Следовательно, можно сказать, что *ускорение тела есть результат действия на него других тел.*

Вообще, если на данное тело действует несколько других тел, то может случиться, что они вместе не изменят его скорость, т. е. не вызовут ускорения. Но если тело движется с ускорением, то всегда мы обнаружим другое тело или другие тела, которые это ускорение вызывают.

***Величина, характеризующая действие одного тела на другое, в результате которого изменяется скорость тела, т. е. возникает ускорение, называется силой.***

Итак, когда говорят, что на тело действует сила или к телу приложена сила, то это значит, что на это тело действует другое тело.

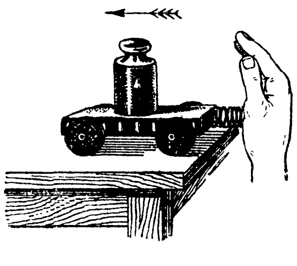


Рис. 51. Пружина, действуя на тело, сжимается.

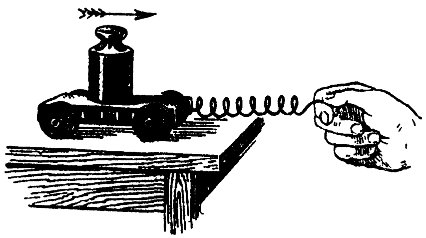


Рис. 52. Пружина, действуя на тело, растягивается.

В зависимости от способа воздействия одного тела на другое различают силу упругости, силу тяжести, силу трения, силу электрического и магнитного происхождений и др. Из названных сил в механике изучаются три первых вида: сила тяжести, сила упругости и сила трения.

Особенно важное значение для нас имеет сила тяжести. Все тела, в том числе и человек, подвергаются воздействию этой силы, притягивающей их к Земле и вызывающей ускоренное падение тел.

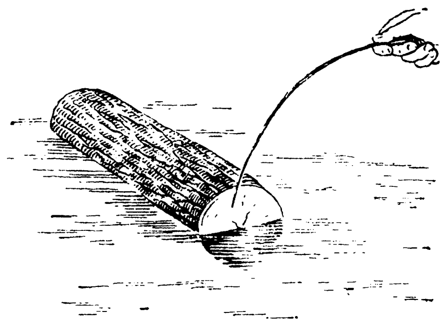


Рис. 53. Тонкая палочка, двигающая тело, изгибается.

Напомним, что за единицу веса принят вес платинового цилиндра (эталона), хранящегося в Международной палате мер и весов в Севре (близ Парижа). Эту единицу веса называют к и л о г р а м м о м в е с а, или к и л о г р а м м о м с и л ы (сокращённо 1 *кГ*).

Одна тысячная доля килограмма веса называется г р а м м о м в е с а, или г р а м м о м с и л ы (сокращённо 1 *Г*).

Другие единицы для измерения силы будут рассмотрены дальше.

**32. Силы и деформация тел.** Когда два тела, соприкасаясь, действуют друг на друга, то оба эти тела деформируются. Пру-



жина, действуя на тело, сжимается (рис. 51) или растягивается (рис. 52); тонкая палочка, двигающая тело, изгибается (рис. 53); мускулы руки напрягаются. Но расширение, сжатие и изгиб представляют собой изменение формы и объёма тела, т. е. деформацию тела. Следовательно, только деформированное тело может действовать с некоторой силой на другое тело. При этом деформируется и то тело, на которое действует первое. Это хорошо видно при действии руки на пружину—мускулы руки напрягаются (деформируются), деформируется и пружина. Деформированная пружина в свою очередь действует на руку, которая испытывает противодействие со стороны пружины.

Итак, при непосредственном соприкосновении *тела действуют друг на друга с некоторой силой только тогда, когда они деформированы.*

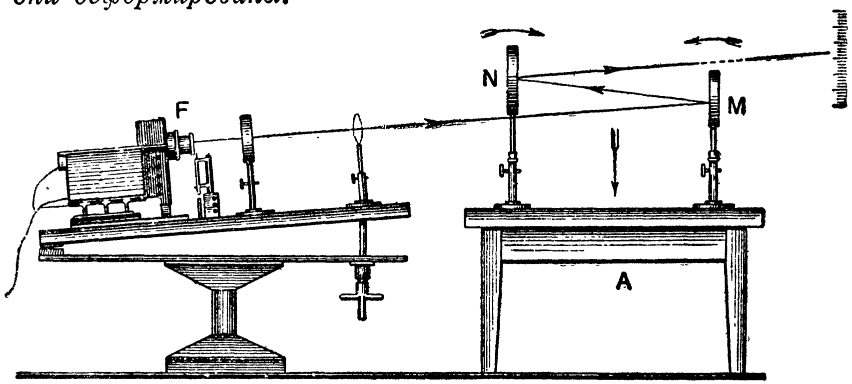



Рис. 54. Установка для наблюдения очень малых деформаций.

Не всегда деформацию тел можно обнаружить на опыте, но она обязательно существует. На рисунке 54 изображена установка, позволяющая обнаружить ничтожно малые деформации тела. На массивном дубовом столе *A* с толстой дубовой крышкой стоят два зеркала *M* и *N*. Луч света от фонаря *F*, отразившись последовательно от обоих зеркал, даёт на шкале зайчик. Всякий прогиб крышки стола наклоняет зеркала в направлении стрелок. Благодаря большой длине светового указателя (несколько метров) чувствительность установки очень велика. Мускульная сила мизинца, который давит на стол в направлении стрелки, вызывает заметное смещение зайчика на шкале, что указывает на деформацию крышки стола.

Итак, *всякое тело деформируется при воздействии любой сколько угодно малой силы. Недеформирующихся тел не существует.*

**33. Равновесие сил. Измерение сил.** Если на тело действует несколько сил, то может случиться, что они вместе не изменят его скорость, т. е. не вызовут ускорения. Такой случай называется **равновесием сил**. Рассмотрим примеры. На рисунке 55 изображён висящий на верёвке груз. На него действует сила тяжести $P$, притягивающая его к Земле, но груз не падает, а остаётся в покое. Это происходит потому, что на груз действует не одна, а две силы: сила тяжести $P$ тянет груз вниз, а натянутая (деформированная) верёвка тянет его с такой же силой $Q$ вверх. В результате действия двух сил груз остаётся в покое, ускорение его равно нулю. Другой пример. На рисунке 56 изображена доска, перекинутая через ручеёк. Под действием веса человека доска прогнулась, возникла другая сила, приложенная к человеку. Эта сила и уравновешивает вес человека.

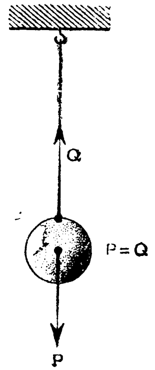



Рис. 55. Равновесие груза под действием сил $P$ и $Q$.

Если под действием двух или нескольких сил тело движется прямолинейно и равномерно, то эти силы также являются уравновешивающимися, движение же в этом случае происходит по инерции.

Рассмотрим, например, равномерное движение поезда на прямолинейном горизонтальном участке пути. Машина паровоза развивает силу тяги, но эта сила не ускоряет движения поезда. Почему это происходит? Известно, что, кроме силы тяги, на поезд действуют трение колёс о рельсы и сопротивление воздуха,— эти силы и замедляют движение поезда. Когда сила тяги и силы, замедляющие движение поезда, уравновешиваются, то они не вызывают изменения скорости поезда. Поезд под действием уравновешивающихся сил движется прямолинейно и равномерно. То же самое можно сказать про всякое тело, движущееся прямолинейно и равномерно.

Рис. 56. Вес человека уравновешен силой, действующей на него со стороны деформированной доски.

Таким образом, ***тело находится в покое или движется прямолинейно и равномерно не только тогда, когда на него не действуют силы, но и тогда, когда действующие силы уравновешиваются.***

Независимо от способа измерения две силы считаются равными по величине, если они, будучи приложены к одному и тому же телу и действуя по одной прямой в противоположные



стороны, взаимно уравновешиваются, т. е. не изменяют скорости тела.

Различные силы могут быть уравновешены силой тяжести. На рисунке 57 показано, что сила упругости растянутой пружины, сжатого газа и сила магнитного притяжения уравновешены весом тел.

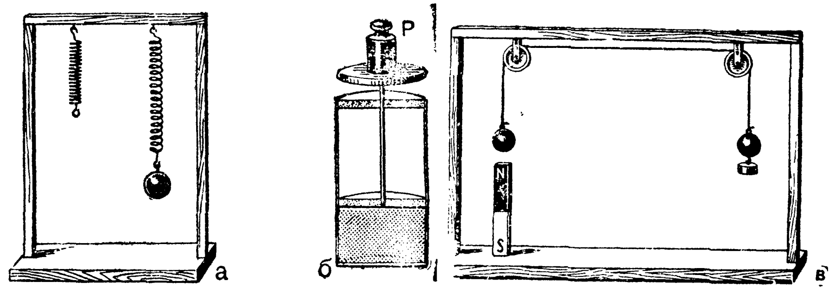



Рис. 57. Силы упругости растянутой пружины (*а*), сжатого газа (*б*) и сила магнитного притяжения (*в*) уравновешены силой тяжести.

Всякая сила может быть сравнена с силой тяжести—весом тела и выражена в единицах веса: в *кГ, Г* и т. д.

Опыт показывает, что два одинаковых груза вместе растягивают пружину на вдвое большую величину, чем каждый из них в отдельности (рис. 58), три груза— на втрое большую и т. д., т. е. **удлинение пружин пропорционально весу груза**. Это даёт возможность проградуировать растяжение пружины в единицах веса и использовать её в приборах для измерения сил — **динамометрах**. Некоторые виды динамометров показаны на рисунке 59. В динамометре, изображённом на рисунке 59, действующая сила растягивает спи-

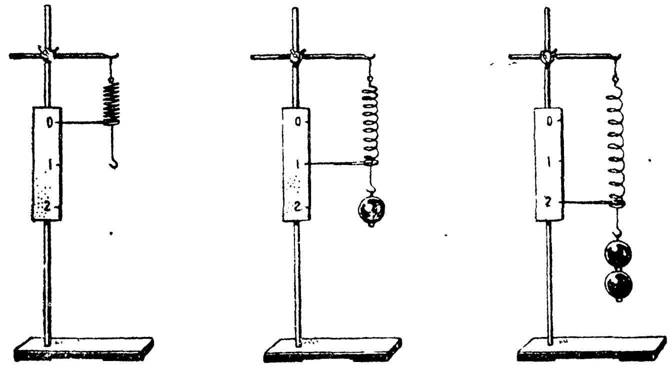



Рис. 58. Растяжение пружины пропорционально весу подвешенного к ней груза.

ральную стальную пружину. Динамометр, изображённый на рисунке 59, *а*, *б*, *в*, применяется для измерения больших сил. В этом динамометре приложенная сила разгибает две упругие стальные пластинки. Действие этого динамометра поясняет рисунок 59, *б*.

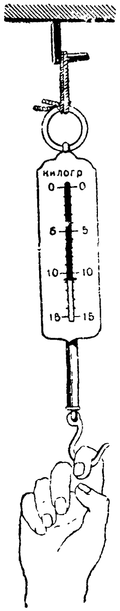



Рис. 59. Пружинный динамометр.

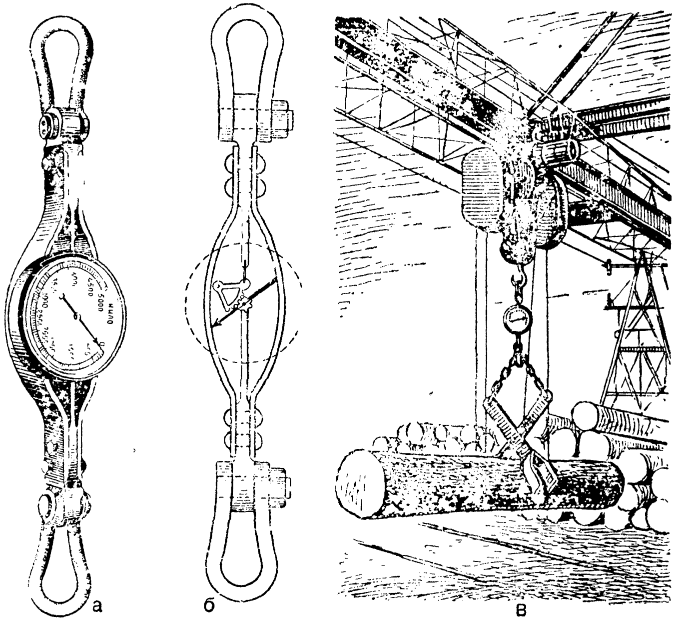



Рис. 59, *а*, *б*, *в*. Динамометр для измерения больших сил. Справа он показан в действии (при погрузке леса одновременно производится его взвешивание).

Динамометры, служащие для измерения веса тел, называются **пружинными весами**.

***Упражнение 23.***

1. С помощью стального троса буксир тянет баржу (от буксира к барже протянут стальной трос) в спокойной воде. Баржа движется равномерно. Указать, какие силы действуют на баржу.

2. На рисунке 60 дан график скорости движения поезда. Что можно сказать о соотношении силы тяги и силы сопротивления движению на различных участках пути поезда?

3. На рисунке 61 показан график пути поезда. Перечертите его в тетради и выделите на графике участки, на которых действующие на поезд силы уравновешены.

**34. Сила упругости.** Мы уже не раз упоминали о силах упругости. Рассмотрим теперь их несколько подробнее. Для этого обратимся к опыту.



Закрепим один конец резинового жгутика (рис. 62), а на другой подвесим груз. Груз немного опустится и остановится. Что задержало движение груза? На груз в состоянии покоя действуют две силы: сила тяжести (вес) $P$, направленная вниз,

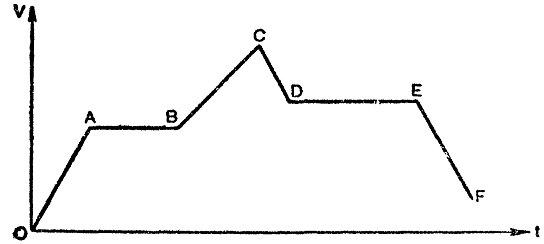



Рис. 60. График скорости движения поезда (к упр. 2).

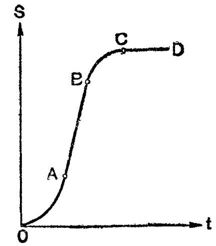



Рис. 61. График пути поезда (к упр. 3).

и сила $Q$, возникшая в резиновом жгутике вследствие его деформации и направленная вверх. Эта последняя сила называется **силой упругости**. Величина её равна весу груза, а величина деформации равна удлинению жгутика.

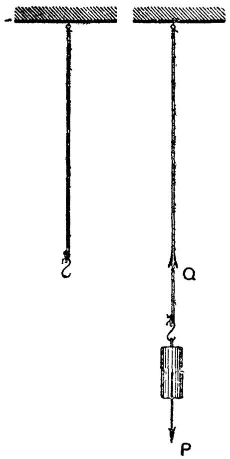



Рис. 62. Вес груза уравновешен силой упругости растянутого резинового жгутика.

С увеличением деформации жгутика увеличивается и возникающая при этом сила упругости.

Если уменьшить нагрузку на жгутик, то сила упругости вызовет движение незакреплённого свободного конца жгутика вверх, деформация его уменьшится, а вместе с ней уменьшится и сила упругости.

Когда жгутик вернётся в начальное состояние, деформация исчезнет, исчезнет и сила упругости.

Силы упругости проявляются всегда, когда тела деформируются: растягиваются, сжимаются, изгибаются, закручиваются и т. д.

**35. Трение скольжения.** В предыдущих параграфах мы ознакомились с двумя видами сил: силой упругости и силой тяжести.

Третий вид сил, который изучается в механике, представляет собой силы трения. В чём особенность этих сил? Чем они отличаются от двух других, рассмотренных уже нами, видов сил? Обратимся к хорошо знакомым нам примерам.

Шарик, скатившись с наклонного жёлоба на пол, продолжает двигаться по полу, но вскоре останавливается. Железнодорожный вагон, движущийся от толчка паровоза с некоторой скоростью, постепенно замедляет своё движение и, наконец, останавливается. Мальчик, разбежавшись, скользит по льду, но как бы ни был гладок лёд, мальчик всё-таки остановится. Причиной всего этого является трение.

Трение, возникающее при скольжении одного тела по другому, называется трением скольжения. Трение полозьев саней о снег, коньков о лёд, трение оси колеса о втулку — всё это примеры трения скольжения.

Одной из основных причин возникновения трения скольжения является шероховатость соприкасающихся тел. На рисунке 63 изображены в увеличенном виде углубления и выступы на двух соприкасающихся поверхностях.

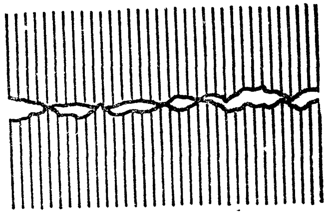


Рис. 63. Углубления и выступы соприкасающихся поверхностей.

При движении одной поверхности по другой их выступы ударяются друг о друга и ломаются; вещество трущихся поверхностей размельчается. Это создаёт некоторую силу, задерживающую движение.

***Во всех случаях при движении одного твёрдого тела по поверхности другого на движущееся тело действует сила, направленная против движения и противодействующая движению. Эта сила называется силой трения.***

Исследуем на опыте, от чего зависит величина силы трения. Для этого воспользуемся установкой, изображённой на рисунке 64.

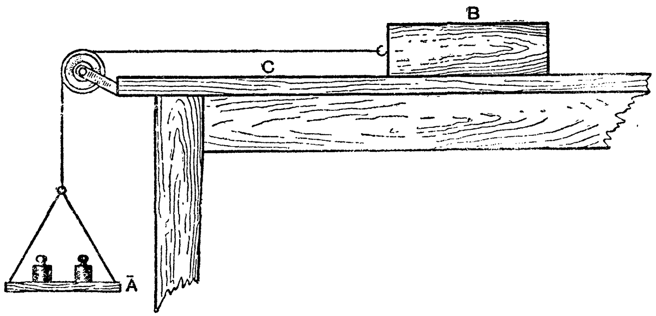



Рис. 64. Установка для изучения силы трения.

Постепенно нагружая чашку $A$ и слегка подталкивая брусок $B$, добьёмся того, чтобы он равномерно скользил по столу $C$. В этом случае сила тяги (вес чашки с грузами) равна по величине силе трения скольжения.

Изменяя нагрузку на брусок $B$, можно установить, что ***с увеличением силы давления пропорционально увеличивается и сила трения.***



Если бы в нашем опыте гладкую доску $C$ заменить более шероховатой, то при одной и той же силе давления сила трения оказалась бы иной.

Точно так же сила трения изменяется при замене одного материала другим.

***Сила трения скольжения в довольно широких пределах не зависит от величины соприкасающихся поверхностей твёрдых тел.*** В этом нетрудно убедиться на опыте, измеряя, например, силу трения, возникающую между различными гранями прямоугольного деревянного бруска и поверхностью доски при движении бруска по доске.

*Величина, равная отношению силы трения $F$ к силе давления $P$, называется коэффициентом трения скольжения.*

Коэффициент трения обозначается буквой $k$: $k = \frac{F}{P}$; отсюда

$$F = kP.$$

**Пример.** Какую наименьшую силу надо приложить, чтобы двигать сани с грузом весом 500 *кГ* по льду, если коэффициент трения скольжения дерева о лёд равен 0,035?

По формуле $F = kP$ найдём, что $F = 0{,}035 \cdot 500$ *кГ* $= 17{,}5$ *кГ*.

В следующей таблице указаны коэффициенты трения скольжения для некоторых материалов.

| Трущиеся тела | Коэффициент трения |
|---|---|
| Сталь по стали | 0,17 |
| Сталь по чугуну | 0,17 |
| Железо по железу | 0,3 |
| Железо по латуни | 0,2 |
| Железо по чугуну и бронзе | 0,18 |
| Бронза по чугуну | 0,22 |
| Латунь по чугуну | 0,16 |
| Дуб по дубу при ‖ волокнах | 0,4 |
| Дуб по дубу при ⊥ волокнах | 0,2 |
| Кожаный ремень по дереву | 0,4 |
| Кожаный ремень по чугуну | 0,28 |
| Сталь по льду | 0,02 |
| Сталь по твёрдому грунту | 0,2—0,4 |
| Резина (шина) по твёрдому грунту | 0,4—0,6 |
| Дерево (полозья) по льду | 0,035 |

**36. Трение покоя.** Мы рассматривали силу трения, возникающую при движении одного предмета по другому. Но может ли существовать сила трения между соприкасающимися твёрдыми телами, когда эти тела находятся в покое?

Когда тело находится в покое на наклонной плоскости, то оно, вне всякого сомнения, удерживается на ней силой трения, в отсутствие которой тело двигалось бы вниз по наклонной плоскости. А если тело находится в покое на горизонтальной плоскости? Пусть, например, на полу стоит стол. Какие на него действуют силы? Нетрудно видеть, что на стол действует его вес, с которым он давит на пол, и равная по величине весу стола сила давления пола на стол. Попробуем передвинуть стол. Для этого потребуется некоторая сила. Если на стол нажать слабо, он не тронется с места. Почему? Действующая на стол сила в этом случае уравновешивается силой трения между

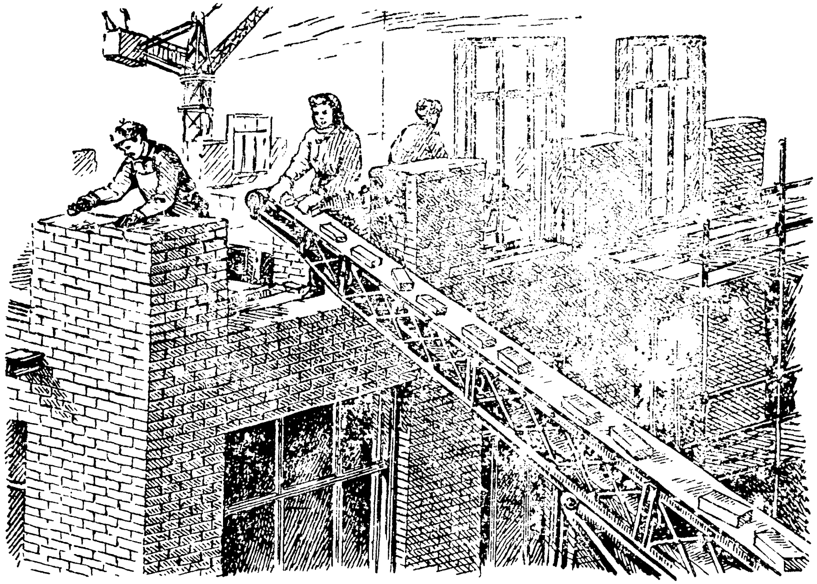


Рис. 65. Кирпичи удерживаются силой трения на ленте транспортёра.

полом и ножками стола. Так как эта сила препятствует телам приходить в движение, её принято называть **силой трения покоя**.

Сила трения покоя направлена всегда против того движения, которое должно было бы возникнуть.

На рисунке 65 изображены кирпичи, которые удерживаются силой трения покоя на наклонной поверхности транспортёра, с помощью которого кирпичи и другие строительные материалы подаются строителям.

**37. Трение качения**. Если одно тело не скользит, а катится по другому, то трение, возникающее при этом, называется **трением качения**. Так, например, когда катится колесо вагона, автомобиля, велосипеда, когда мы перекатываем круглые брёвна или бочки по земле, то проявляется трение качения.

Установим книгу наклонно и положим на неё круглый карандаш вдоль наклона книги. Карандаш остаётся в покое. Положим



тот же карандаш поперёк наклона книги — он будет скатываться с неё. Катить бревно во много раз легче, чем волочить. Это происходит потому, что сила трения качения в несколько десятков раз меньше силы трения скольжения. Поэтому, желая облегчить передвижение одного тела по другому, заменяют трение скольжения трением качения. Тяжёлую мебель, например, снабжают колёсиками, между осью и втулкой велосипеда помещают гладкие стальные шарики, которые при движении велосипеда катятся по втулке и оси, и т. п. С помощью шариковых и роликовых подшипников трение скольжения заменяют трением качения. На рисунке 66 изображены одни из видов шариковых и роликовых подшипников.

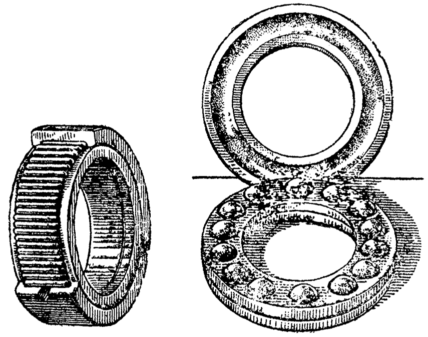


Рис. 66. Роликовый и шариковый подшипники.

**38. Значение трения.** Трение может быть полезным и вредным. Когда оно является полезным, его стараются увеличить, когда же оно вредно, его всячески стараются уменьшить.

Рассмотрим некоторые примеры.

Трение, например, останавливает автомобиль при торможении. Без трения он не мог бы и начать движения: колёса вращались бы, а автомобиль продолжал бы стоять на месте.

Трение даёт возможность автомобилю двигаться.

То же самое можно сказать и о паровозе. Одно лишь давление пара в цилиндре паровоза не может привести в движение паровоз. Для этого необходима внешняя (по отношению к паровозу) сила — действие рельсов на ведущие колёса паровоза. Такой внешней силой и является сила трения между ведущими колёсами паровоза и рельсами. Этот вопрос будет подробно рассмотрен далее в § 53а.

С увеличением нагрузки и скорости движения поездов на железнодорожном транспорте увеличивают и вес паровозов. Действительно, чем больше вес паровоза, тем большее давление производит паровоз на рельсы, тем больше будет сила трения между ведущими колёсами паровоза и рельсами, а эта сила и создаёт тягу паровоза.

Тот факт, что на слишком скользких рельсах сцепления не получается и колёса начинают скользить (буксовать), показывает, что коэффициент трения зависит от состояния трущихся поверхностей. Для увеличения коэффициента трения рельсы в необходимых случаях посыпают песком, а задние колёса автомобиля (ведущие колёса) обёртывают цепью.

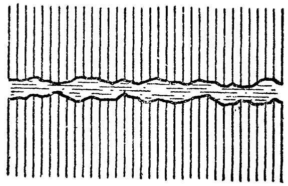
Без трения ни люди, ни животные не могли бы передвигаться по земле. Не будь трения, предметы выскальзывали бы из рук.

Рассмотрим теперь случаи, когда с трением приходится бороться.

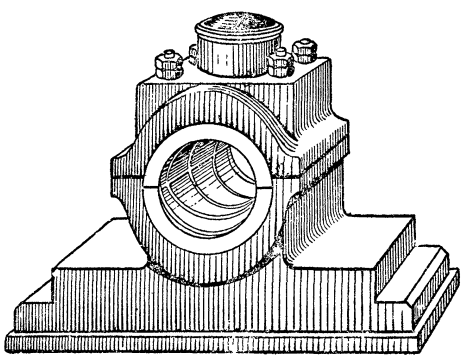
Во всех машинах часть работы совершается по преодолению силы трения, в результате чего происходит нагревание подшипников, шкивов, скользящих частей и т. п. Трение в этих случаях вредно.

Уменьшение трения в основном достигается смазкой и заменой трения скольжения трением качения. Смазка сильно уменьшает трение (в среднем в 8—10 раз). Причина уменьшения трения смазкой заключается в том, что масло заполняет все неровности трущихся поверхностей и располагается тонким слоем между ними так, что эти поверхности как бы перестают касаться друг друга (рис. 67, *а*),— при этом скользят относительно друг друга отдельные слои жидкости.

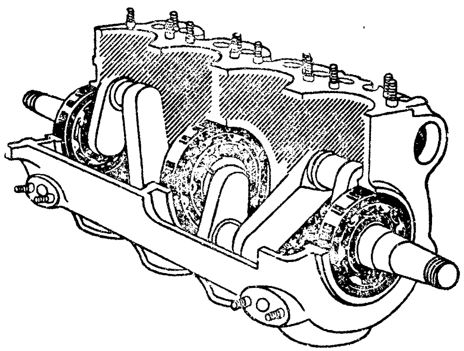
Замена в машинах подшипников скольжения шариковыми подшипниками раз в 20—30 уменьшает потери на трение. На рисунке 67, *б* изображён подшипник скольжения. Вкладыши этого подшипника делаются из баббита (сплав свинца, олова, сурьмы и меди). Между валом, который вставляется внутрь вкладыша подшипника, и вкладышем при вращении вала возникает трение скольжения. На рисунке 67, *в* показано применение шариковых подшипников в двигателе.



а



б



в

Рис. 67. *а*) смазка между трущимися поверхностями; *б*) подшипник скольжения; *в*) коленчатый вал двигателя на шариковых подшипниках.



Шариковые и роликовые подшипники широко используются в технике. Без этих подшипников трудно представить себе современную промышленность и транспорт.

***Упражнение 24.***

1. Лошадь везёт воз весом в 1 *Т* равномерно по льду на санях со стальными подрезами. Определить силу тяги, развиваемую лошадью. Чему равнялась бы сила тяги, если сани были бы без подрезов?

2. Грузовой автомобиль весом 5 *Т* движется равномерно по булыжной мостовой. Коэффициент трения 0,023. Определить силу трения, преодолеваемую автомобилем.

3. Чтобы сдвинуть с места стол весом 40 *кГ*, потребовалось приложить силу в 20 *кГ*. После того как стол сдвинули с места, для дальнейшего равномерного передвижения его достаточна была сила в 15 *кГ*. Определить коэффициент трения покоя и скольжения.

4. Сила трения между железной осью и бронзовым вкладышем подшипника без смазки равна 180 *кГ* при нагрузке на ось 1 *Т*. Определить коэффициент трения скольжения железа по бронзе.

5. При исследовании зависимости силы трения дерева по дереву от силы давления деревянный брусок нагружался разными грузами и передвигался равномерно по горизонтальной деревянной доске. Были получены следующие данные:

| № п/п | Вес бруска (в *Г*) | Нагрузка (в *Г*) | Сила тяги при равномерном движении (в *Г*) |
|---|---|---|---|
| 1 | 60 | — | 20 |
| 2 | 60 | 100 | 60 |
| 3 | 60 | 200 | 90 |
| 4 | 60 | 300 | 130 |
| 5 | 60 | 500 | 200 |

Определить по этим данным среднее значение коэффициента трения скольжения дерева по дереву.

**39. Сила-вектор.** Всякая сила действует в некотором направлении. Так, например, сила тяжести действует всегда в вертикальном направлении, а сила трения направлена в сторону, противоположную движению тела.

Кроме того, действие силы на тело зависит от того, на какую часть данного тела она действует, то есть зависит от точки приложения силы. Это видно из следующего опыта (рис. 68). Если действовать какой-нибудь силой на диск *A* в направлении *AF*, то диск будет двигаться в том же направлении. Если же действовать той же силой на диск в направлении *BF*, то диск будет двигаться в направлении этой силы и одновременно поворачиваться.

Сила, таким образом, характеризуется тремя признаками: 1) точкой приложения, 2) направлением и 3) величиной.

***Сила — величина векторная,*** *поэтому графически она изображается направленным отрезком прямой.*

Направление отрезка совпадает с направлением силы, длина его в соответствии с выбранным масштабом выражает величину силы, а начало отрезка указывает точку приложения силы. На рисунке 69 стрелкой $AF$ изображена сила, действующая на лодку.

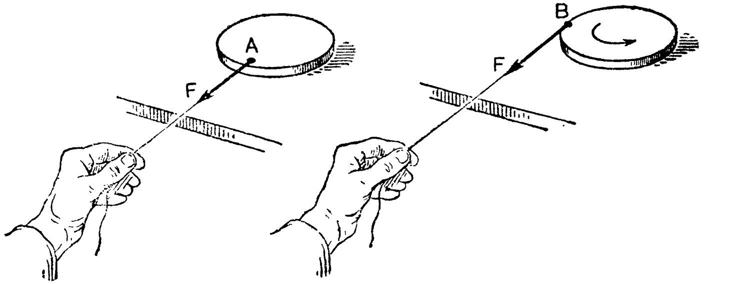



Рис. 68. Действие силы зависит от точки её приложения.

В случае твёрдого тела действие силы, приложенной к какой-нибудь точке тела, не изменится, если эту силу приложить к другой точке, лежащей на прямой, по которой направлена сила. Так, например, точку приложения $A$ силы, действующей на диск (рис. 68), можно перенести в любую точку, лежащую вдоль нити. Этим объясняется, что пружина динамометра (рис. 69 а) растягивается одинаково—будет ли гиря надета на крючок или привешена к концу нити.

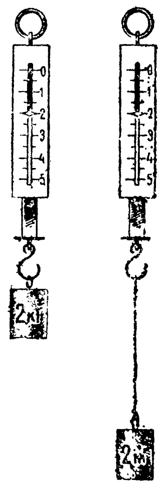


Рис. 69а. Действие силы не изменяется при переносе точки её приложения.

***Упражнение 25.***

1. Подъёмный кран (стр. 9) поднимает равномерно вертикально вверх груз весом 800 *кГ*. Изобразить силы, действующие на груз, векторами в масштабе: 1 *см* соответствует 200 *кГ*.

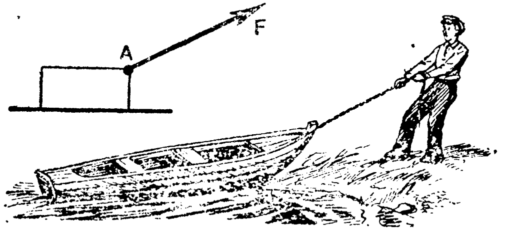



Рис. 69. Графическое изображение силы.

2. На горизонтальном участке пути сила тяги паровоза 3000 *кГ*, сила сопротивления движению 1000 *кГ*. Изобразить эти силы векторами в масштабе: 1 *см* соответствует 1000 *кГ*. Будет ли поезд двигаться равномерно? Почему?

**40. Сложение сил. Равнодействующая сила.** В большинстве случаев, с которыми мы встречаемся в практике, на тело действует одновременно не одна, а несколько сил. Под действием этих сил тело может двигаться или находиться в покое.



Во многих случаях, когда на тело действуют несколько сил, можно подыскать одну такую силу, которая по своему действию равноценна этим нескольким силам.

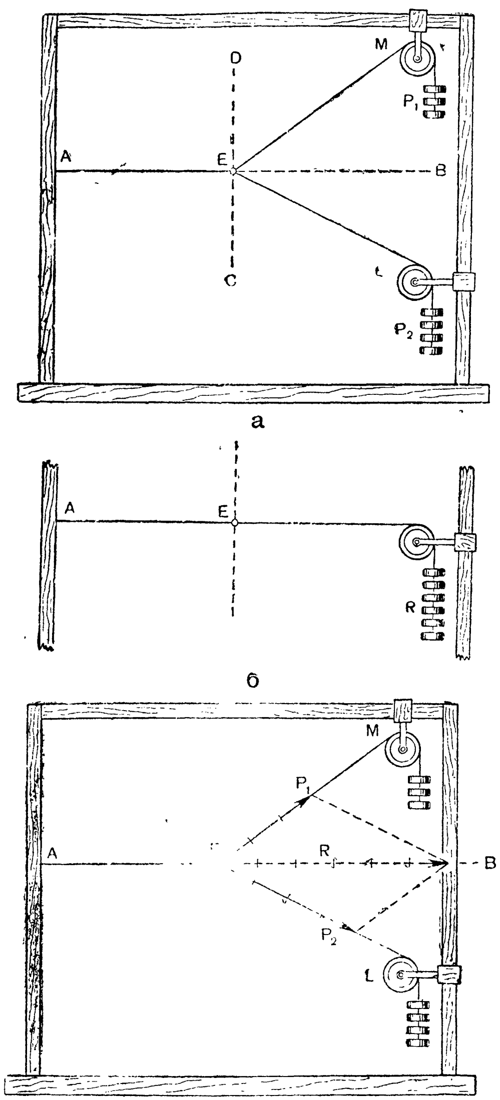



Рис. 70. Сложение сил, направленных под углом друг к другу.

***Сила, которая производит на тело такое же действие, как несколько сил вместе, называется равнодействующей этих сил.***

Те силы, которые мы заменяем равнодействующей силой, называются с о с т а в л я ю щ и м и.

*Нахождение равнодействующей нескольких данных сил называется сложением сил.*

Рассмотрим, как найти равнодействующую двух сил, приложенных к одной точке тела.

На рисунке 70, *а* изображён резиновый жгут $AE$, который под действием сил $P_1$ и $P_2$ растянут по прямой $AB$ до вертикальной прямой $DC$. Подберём такую силу $R$, которая растягивает жгут $AE$ так же, как силы $P_1$ и $P_2$, действуя совместно (рис. 70, *б*). Сила $R$ является равнодействующей сил $P_1$ и $P_2$.

Отложим по направлениям нитей $EM$ и $EL$ отрезки, соответствующие в некотором масштабе силам $P_1$ и $P_2$ (рис. 70, *в*). Построим на этих отрезках, как на сторонах, параллелограм. Диагональ этого параллелограма, измеренная в том же масштабе, равна силе $R$, которая является равнодействующей сил $P_1$ и $P_2$, действующих на тело под углом друг к другу.

На основании многочисленных опытов, подобных только что рассмотренному, установлено следующее общее правило сложения сил:

***равнодействующая двух сил, действующих на тело под углом, изображается по величине и по направлению диагональю параллелограма, построенного на этих силах, как на сторонах.***

Это правило известно под названием п р а в и л а  п а р а л л е л о г р а м а  с и л.

Если стороны параллелограма не меняются по величине, то величина диагонали зависит от угла, образуемого сторонами.

Передвигая блоки $L$ и $M$ (рис. 70, $a$), будем уменьшать угол между нитями, привязанными к жгуту; мы заметим, что резиновый жгут будет всё больше и больше растягиваться.

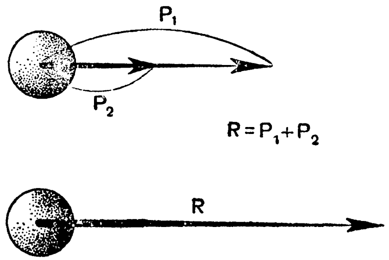



Рис. 71а. Равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой в одну сторону.

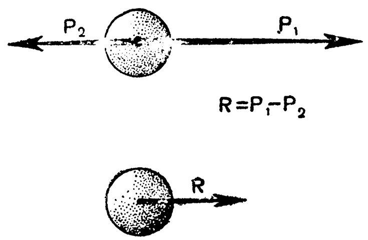



Рис. 71б. Равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой в разные стороны.

При увеличении угла между нитями уменьшится и растяжение жгута.

Следовательно, чем меньше угол между действующими на тело двумя силами, тем больше их равнодействующая, и наоборот.

При угле 0° и 180° слагающие силы действуют по одной прямой. Эти случаи иллюстрируются рисунками 71а и 71б.

На рисунке 71а показано, что силы $P_1$ и $P_2$ действуют в одном направлении. Равнодействующая $R$ равна их сумме:

$$R = P_1 + P_2.$$

На рисунке 71б показано, что силы действуют по одной прямой, равно в противоположных направлениях; их равнодействующая на разности сил:

$$R = P_1 - P_2.$$

Любое число сил, направленных по одной прямой, путём складывания их попарно мы всегда можем свести к двум силам, направленным в одну сторону или в противоположные стороны, а равнодействующую двух таких сил легко найти.

*Сила, равная по величине равнодействующей и противоположно ей направленная, называется уравновешивающей силой.*



На рисунке 72 сила $R$ — равнодействующая сил $Q$ и $S$, а сила $P$ — уравновешивающая.

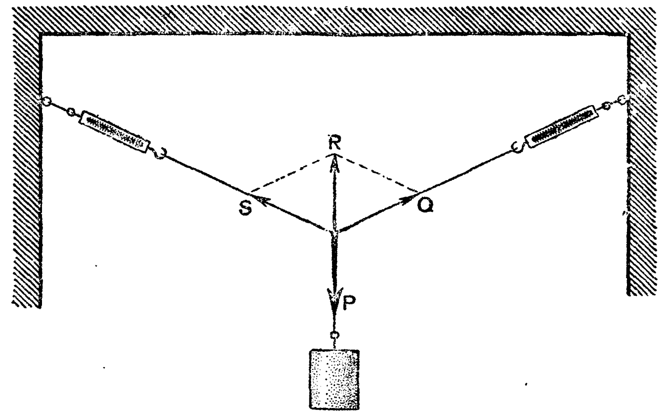



Рис. 72. Равнодействующая $R$ и уравновешивающая $P$ сил $Q$ и $S$.

***Если силы, действующие на тело, уравновешены приложенной к телу уравновешивающей силой, то тело или находится в покое, или, если привести его в движение, будет двигаться равномерно и прямолинейно.***

***Упражнение 26.***

1. Найти построением равнодействующую сил в 10 *кГ* и 6 *кГ*, действующих под углом 60°.
2. Найти построением равнодействующую сил в 9 *кГ* и 12 *кГ*, действующих под прямым углом.
3. Найти равнодействующую двух равных сил, действующих под углом 120°.
4. Чему равна равнодействующая трёх равных сил, действующих в одной плоскости под углом 120°?
5. Два трактора, идущие по берегам канала, тянут баржу. Баржа движется равномерно, причём натяжение буксирных канатов одинаково и равно 200 *кГ*. Канаты образуют угол 45°. Определить силу сопротивления воды.
6. На одну точку тела действуют следующие силы: 17 *кГ* вертикально вверх, 11 *кГ* вертикально вниз, 18 *кГ* горизонтально вправо и 10 *кГ* горизонтально влево. Определить равнодействующую этих сил.

**41. Разложение силы на две составляющие, действующие под углом друг к другу.** Правило параллелограма даёт нам возможность приложенные к телу две силы, направленные под углом, заменить одной. Пользуясь тем же правилом, мы можем осуществить обратную операцию—заменить одну силу двумя силами (составляющими), направленными под углом друг к другу.

*Замена одной силы двумя силами, направленными под углом друг к другу и производящими такое же действие, как одна сила, называется разложением силы.*

Рабочий везёт тележку, натягивая верёвку под углом 45° к горизонту (рис. 73). Тележка движется горизонтально, т. е. не по направлению приложенной силы. Чтобы установить величину силы, действующей на тележку в направлении её перемещения, разложим силу натяжения верёвки на две составляющие силы: одну составляющую направим по направлению движения тележки, другую — перпендикулярно движению. Чтобы определить величины этих сил, проведём из конца вектора $F$ линии, параллельные избранным нами направлениям. Стороны $Q$ и $P$ полученного параллелограма и будут представлять собой искомые составляющие силы. Из них только сила $Q$, направленная

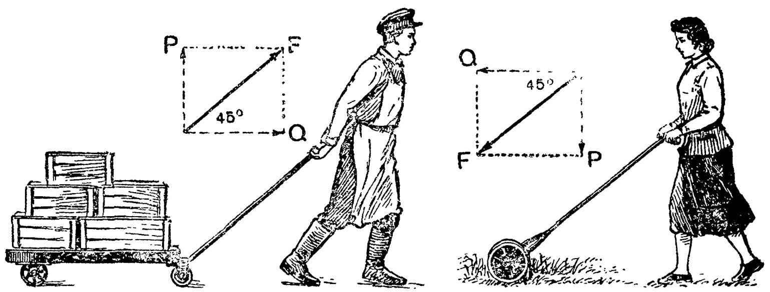



Рис. 73. Примеры разложения силы на горизонтальную и вертикальную составляющие.

горизонтально, поддерживает движение тележки. Совместное действие сил $Q$ и $P$ такое же, как действие силы $F$.

На рисунке 73 показан другой пример разложения силы на составляющие. Для него справедливы те же рассуждения.

Разложение силы на составляющие имеет большое практическое значение. Рассмотрим несколько примеров.

На странице 9 имеется рисунок башенного крана. На рисунке 74 дана схема его верхней части; здесь $AB$—стрела крана, $CB$ — трос, поддерживающий её, $P$ — вес поднимаемого груза, $P_1$—противовес. При проектировании крана важно знать, какие напряжения создаёт поднимаемый груз в рабочих частях крана, например в стреле $AB$ и тросе $CB$. Проведём наши исследования на модели этой части крана.

На рисунке 75 дана схема такой модели. Здесь верёвка $MN$ изображает трос $CB$; для измерения натяжения, которое создаётся в верёвке поднимаемым грузом $P$, она прикреплена в точке $M$ к динамометру. Стержень $KN$ изображает стрелу крана $AB$; этот стержень упирается в другой динамометр, измеряющий возникающее в нём напряжение (в точке $K$ динамометр прикреплён к неподвижной стенке).



Пусть на модели вес поднимаемого груза $P=3$ *кГ*. Груз растягивает верёвку $MN$ и одновременно сжимает стержень $KN$. Разложим силу $P$ на составляющие: $F_1$—по направлению верёвки и $F_2$—по направлению стержня. Мы увидим, что в данном случае сила натяжения верёвки $F_1$ будет больше веса груза, она равна 5 *кГ*; сила же $F_2$, сжимающая стержень, равна 4 *кГ*, т. е. также больше $P$.

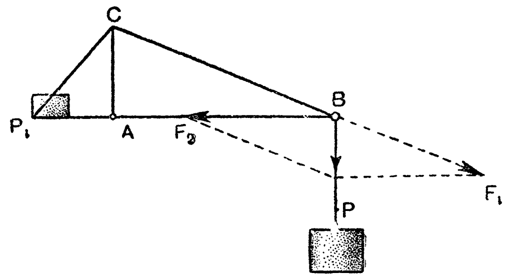



Рис. 74. Схема верхней части башенного крана.

Теперь обратимся к показаниям динамометров на модели. Эти показания даны на рисунке 75: они оказываются в точном соответствии с результатами разложения силы $P$ по правилу параллелограма, которое дано на этом же рисунке.

Результаты опыта, проведённого нами на модели крана, справедливы и для реального крана, схема которого дана на рисунке 74.

На рисунке 76 дана схема кривошипно-шатунного механизма, преобразующего поступательное движение поршня во вращательное движение маховика (не показанного на схеме). $F$ — сила давления пара на поршень в данном положении. Разложим его по направлению шатуна и направлению, перпендикулярному к поршневому штоку. Составляющая $F_1$ и есть сила, действующая на шатун. Разложив далее силу $F_2$, равную $F_1$, на составляющие: $F_3$ по направлению касательной к окружности в точке $C$ (по этой окружности движется цапфа кривошипа) и $F_4$ — к ней перпендикулярную, мы получим силу $F_3$, в данном положении вращающую кривошип.

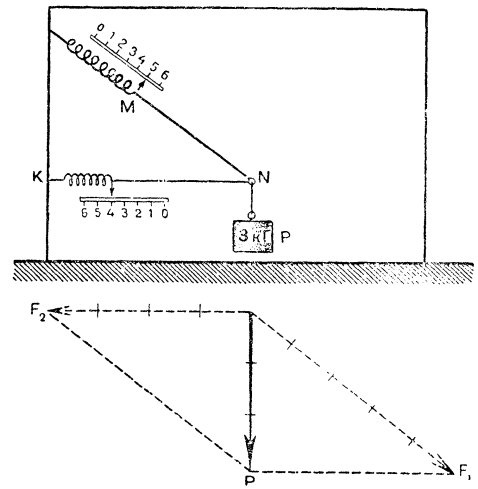



Рис. 75. Модель верхней части башенного крана.

**42а. Условие равновесия тела на наклонной плоскости.** Наклонными плоскостями часто пользуются на практике для погрузки и выгрузки тяжёлых грузов. Их часто применяют на строительных работах. Один из примеров применения наклонной плоскости изображён на рисунке 77. Небольшой участок дороги в гору также можно рассматривать как наклонную плоскость.

Рассмотрим условие равновесия тела на наклонной плоскости при отсутствии трения.

Пусть на наклонной плоскости $ABC$ (рис. 78), длина которой $l = AB$, высота $h = BC$, лежит тело, вес которого на рисунке

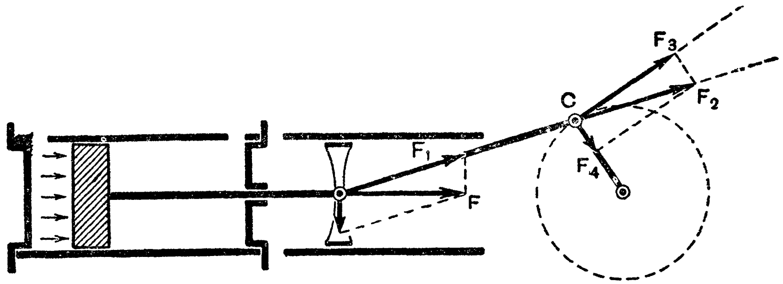



Рис. 76. Схема кривошипно-шатунного механизма.

изображён вектором $P$. Разложим силу $P$ на две составляющие: $F_1$ — по направлению $OM$, параллельному наклонной плоскости, и $F_2$ — перпендикулярному к ней. С силой $F_2$ тело будет давить на плоскость, под действием же силы $F_1$ оно будет двигаться вниз по наклонной плоскости.

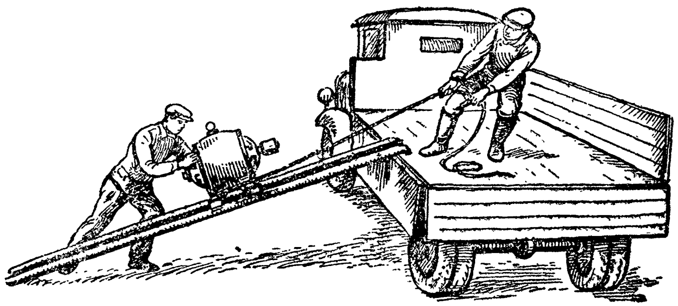


Рис. 77. Применение наклонной плоскости для погрузки.

Таким образом, одну силу $P$ можно заменить двумя силами: силой $F_1$, скатывающей тело вниз по наклонной плоскости, и $F_2$, прижимающей его к плоскости.

Если трение не принимать во внимание, то для удержания тела в равновесии на наклонной плоскости необходимо приложить к нему силу, направленную вверх параллельно наклону и по величине равную $F_1$.



Величину силы $F_1$ можно найти из подобия треугольников $\triangle ABC$ и силового $\triangle F_1OP$, заштрихованного на рисунке (треугольники подобны вследствие равенства углов):

$$\frac{OF_1}{OP} = \frac{BC}{AB} \text{ или } \frac{F_1}{P} = \frac{h}{l},$$

откуда

$$F_1 = P\,\frac{h}{l}.$$

*Сила, скатывающая тело с наклонной плоскости, во столько раз меньше веса тела, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше её длины.*

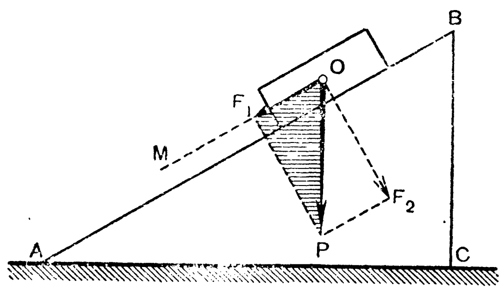



Рис. 78. Тело на наклонной плоскости.

Из подобия тех же треугольников найдём силу, с которой тело давит на наклонную плоскость:

$$F_2 = P\,\frac{AC}{AB}.$$

*Сила, с которой тело давит на наклонную плоскость, во столько раз меньше веса тела, во сколько раз основание наклонной плоскости меньше её длины.*

***Упражнение 27.***

1. Длина наклонной плоскости 4 *м*, высота 1 *м*. Определить, какая требуется сила, чтобы удержать в равновесии на наклонной плоскости груз весом 100 *кГ*. Трение в расчёт не принимать. Если при наличии трения груз не скользит вниз, то чему равна сила трения?
2. Лошадь везёт воз весом 800 *кГ* вверх по уклону, подъём которого составляет 1 *м* на каждые 16 *м* пути. Определить силу тяги, пренебрегая трением колёс о почву.
3. На кронштейне (рис. 78а) висит груз весом 100 *кГ*. Определить силу, растягивающую поперечину $AB$, и силу, сжимающую укосину $BC$; $AB = 64$ *см*, $BC = 80$ *см*.

**42б. Сила, действующая параллельно основанию наклонной плоскости.** Удержать тело в равновесии на наклонной плоскости можно и силой, направленной, например, параллельно основанию наклонной плоскости. Чтобы найти величину такой силы, разложим вес тела $P$ на составляющие: $F$ — параллельную основанию $AC$, и $F_1$ — перпендикулярную $AB$ (рис. 79).

Сила $F_1$ только прижимает тело к наклонной плоскости и вызвать движение не может. Чтобы тело не скатывалось с наклонной плоскости, надо силу $F$ уравновесить равной ей по величине, но противоположной по направлению силой $F_2$, направленной по той же прямой, как и $F$.

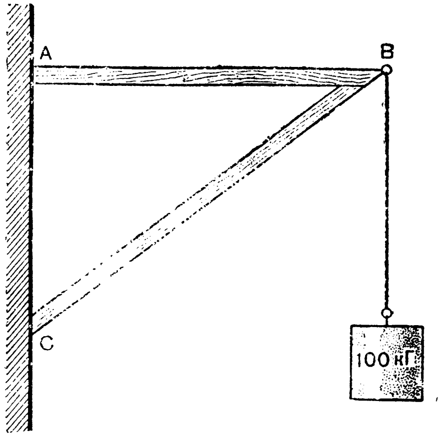



Рис. 78а К упражнению 3.

Из подобия треугольников $FOP$ и $ABC$ следует, что

$$\frac{F}{P} = \frac{BC}{AC}; \quad F = P\frac{BC}{AC}.$$

Но $F = F_2$, поэтому и

$$F_2 = P\frac{BC}{AC}.$$

Следовательно, если не принимать во внимание трение, сила, удерживающая тело в равновесии на наклонной плоскости и направленная параллельно основанию, во столько раз меньше веса тела, во сколько высота наклонной плоскости меньше длины её основания.

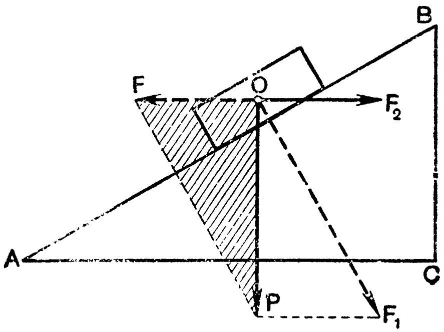



Рис. 79. Разложение силы на наклонной плоскости.

Из подобия тех же треугольников следует, что $\frac{F}{F_1} = \frac{BC}{AB}$, т. е. *при равновесии сила, действующая параллельно основанию наклонной плоскости, во столько раз меньше силы, действующей перпендикулярно к ней, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше её длины.*

Этот случай равновесия сил на наклонной плоскости мы используем дальше при рассмотрении клина и винта.

**42в. Клин.** Клин представляет собой разновидность наклонной плоскости и имеет разнообразные применения. Клин, например, составляет основную часть колющих, режущих, строгающих инструментов: ножниц, топора, колуна, стамески, рубанка, лемеха плуга и др. Схемы работы некоторых из перечисленных инструментов изображены на рисунке 80.

Рассмотрим действие клина при колке дров. На тыльную поверхность клина (обух) действует сила $P$, вгоняющая клин в трещину (рис. 80а).



**Силы, с которыми действует клин на полено, найдём, разложив силу $P$ на две составляющие $F$ и $F$, перпендикулярные щекам клина.**

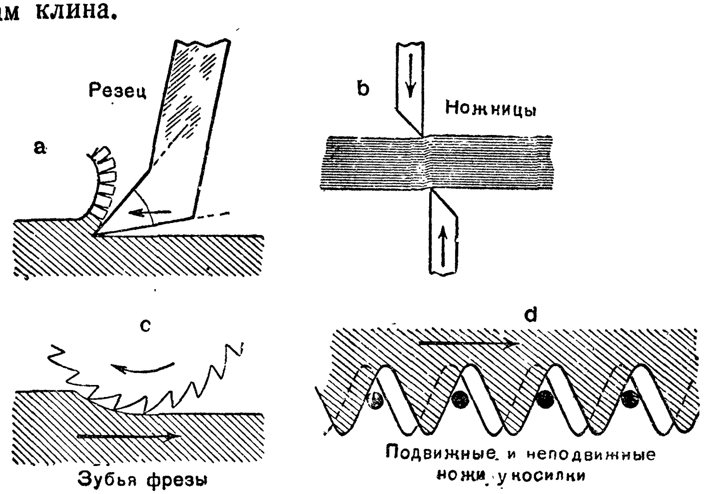



Рис. 80. Примеры применения клина.

Каждая из этих составляющих равна и противоположна той силе (не изображённой на рисунке), с которой раскалываемое

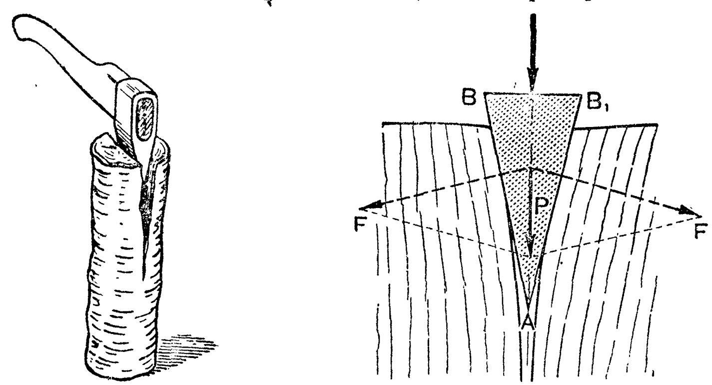



Рис. 80а. Применение клина при колке дров.

полено действует на клин. Если бы не была приложена сила $P$, то клин при отсутствии трения был бы вытолкнут из полена.

Из подобия двух равнобедренных треугольников заштрихованного и силового следует:

$$\frac{F}{P} = \frac{AB}{BB_1},$$

где $AB$ — длина щеки клина и $BB_1$ — ширина обуха клина.

Таким образом, если не принимать в расчёт трение, то при равновесии клина сила, действующая перпендикулярно обуху, во столько раз меньше силы, действующей перпендикулярно щеке, во сколько раз ширина обуха меньше длины щеки.

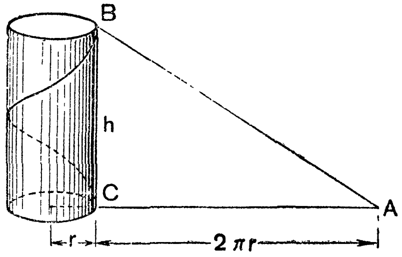



Рис. 80б. Образование винтовой линии.

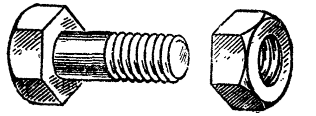


Рис. 80в. Винт с гайкой.

Однако во многих случаях величина силы давления на щеку клина весьма значительна, поэтому и сила трения, действующая вдоль этой щеки, тоже значительна. Она в несколько раз может превысить величину силы, действующей перпендикулярно обуху.

Так, например, если засадить в полено топор с небольшим углом заострения, то топор после удара завязнет в нём и потребуется большое усилие, чтобы его вытащить.

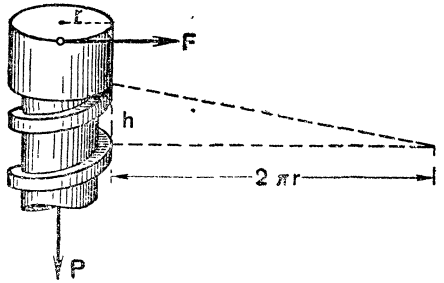



Рис. 80г. К условию равновесия сил на винте.

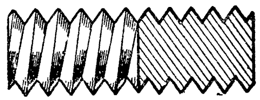


Рис. 80д. Винт с треугольной резьбой.

При некоторых углах заострения давящие на щеку клина силы не могут его вытолкнуть из зазора.

На этом основано применение клина для скрепления частей изделий. Например, клином является шпонка, закрепляющая шкив на оси.

**42г. Винт.** Винт представляет собой цилиндрическое тело с резьбой. Резьба делается по в и н т о в о й  л и н и и.

Рассмотрим простейший случай получения винтовой линии. Возьмём цилиндр с высотой $h$ и радиусом $r$ (рис. 80б). Вырежем из бумаги прямоугольный треугольник, высота которого $BC = h$, а основание $AC = 2\pi r$ — длине окружности основания цилиндра. Навернём треугольник на цилиндр, тогда



гипотенуза $AB$ на поверхности цилиндра опишет один виток винтовой линии.

Винт применяется вместе с гайкой (рис. 80в), имеющей такую же резьбу, как и винт.

Если винт один раз повернётся в гайке, то, как видно из рисунка 80б, он поднимется или опустится на высоту $BC$, равную ш а г у  в и н т а $h$.

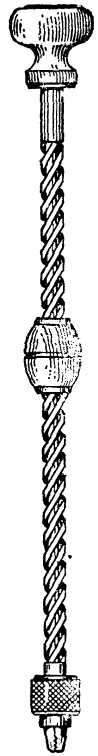
Рассмотрим условия равновесия сил на винте.

На рисунке 80г схематически изображена часть винта. Допустим, что он ввёрнут в неподвижную гайку (на чертеже не показанную). Пусть на винт действует сила $P$, направленная по оси винта. Если не принимать во внимание трение, то под действием этой силы резьба винта будет скользить по резьбе гайки, как по наклонной плоскости (изображённой пунктиром), и винт будет опускаться. Чтобы удержать винт в равновесии, приложим к его головке силу $F$, параллельную основанию пунктирной наклонной плоскости.

В предыдущем параграфе было показано, что при равновесии на наклонной плоскости сила, действующая параллельно основанию, во столько же раз меньше веса тела, во сколько раз высота наклонной плоскости меньше основания. Поэтому и на нашем винте:

$$\frac{F}{P} = \frac{h}{2\pi r}.$$

Следовательно, если не принимать во внимание трение, то при равновесии винта *сила, действующая по касательной к окружности головки винта, во столько раз меньше силы, действующей на винт вдоль его оси, во сколько раз шаг винта меньше длины окружности головки винта.*



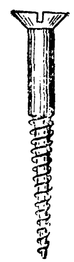


Рис. 80е. Дрель и шуруп.

Резьба делается прямоугольной (рис. 80г) или треугольной (рис. 80д).

Прямоугольная нарезка применяется в винтах для подъёма тяжестей, например в домкрате (см. § 67), в винтовом прессе (см. § 68), а треугольная, с наибольшим трением, — для скрепления деталей различных машин и приборов. Треугольную нарезку имеет, например, шуруп, а у дрели устраивается прямоугольная нарезка (рис. 80е).

**43. Условия равновесия тела, имеющего ось вращения.** Комнатная дверь может вращаться вокруг вертикальной оси. Надавив на дверь рукой недалеко от оси вращения, мы заметим, что, для того чтобы таким образом открыть её, надо приложить значительное усилие. Наоборот, дверь открывается легко, если действовать на неё на большом расстоянии от оси. Поэтому и ручка у двери укрепляется далеко от оси вращения.

Пример с дверью показывает нам, что вращающее действие силы зависит не только от величины силы, но и от расстояния между вектором силы и осью вращения.

*Длина перпендикуляра, проведённого от оси вращения до прямой, совпадающей с направлением действия силы, называется плечом силы.* Так, например, плечом силы, действую-

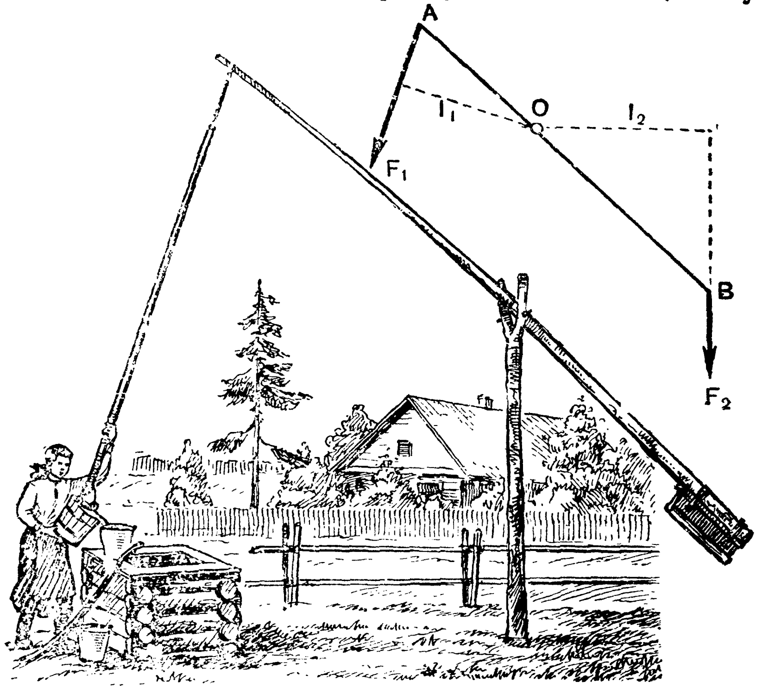



Рис. 81. Силы, действующие на рычаг, и их плечи.

щей на шкив при ремённой передаче, является радиус шкива. На рисунке 81 $l_1$ — плечо силы $F_1$, действующей на рычаг $AB$, а $l_2$ — плечо силы $F_2$.

Если тянуть за ручку двери так, чтобы прямая, совпадающая с направлением силы, проходила через ось вращения, то дверь не будет вращаться. В этом случае величина плеча силы равна нулю и сила не производит никакого вращающего действия.

Вращающее действие силы тем больше, чем больше величина силы и чем больше плечо силы. Оно пропорционально величине силы и длине плеча силы. Поэтому вращающее действие силы принято характеризовать особой величиной, измеряемой произведением силы на плечо.



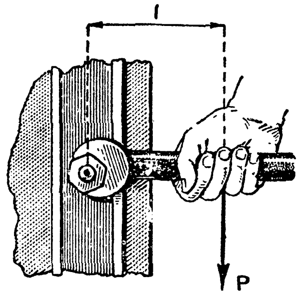
*Величина, измеряемая произведением силы на её плечо, называется вращающим моментом силы, или просто моментом силы.*

Если обозначить момент силы через $M$, то данное определение можно выразить формулой:

$$M = F \cdot l.$$

Произведение $Pl$ (рис. 81а) является моментом силы, действующей на гаечный ключ, относительно оси гайки. Если нажать на ключ в направлении, противоположном вектору силы $P$, гайка будет отвинчиваться.

Для указания направления вращения тела сопоставляют это вра-



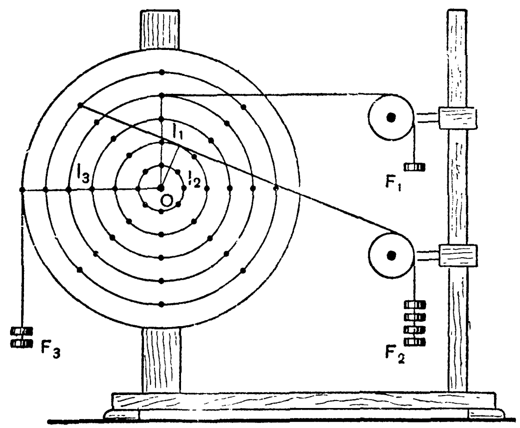




Рис. 81а. Завинчивание гайки. Рис. 82. Прибор для проверки правила моментов.

щение с движением стрелки часов. *Момент, вращающий тело по часовой стрелке, принято считать положительным, против часовой стрелки — отрицательным.* Так, например, момент силы $F_1$ на рисунке 81 отрицательный, так как он вращает рычаг против часовой стрелки, а момент силы $F_2$ положительный. При завинчивании гайки момент силы $P$ относительно оси гайки положительный, а при отвинчивании отрицательный.

Исследуем условия равновесия тела, имеющего ось вращения. Для этого воспользуемся диском, изображённым на рисунке 82. Диск может вращаться вокруг оси, проходящей через его центр $O$.

Чтобы удобнее измерять плечи сил, на диске начерчен ряд концентрических окружностей на одинаковом расстоянии друг от друга. Радиус первой окружности 1 *см*, второй — 2 *см* и т. д. На окружностях по диаметрам вбиты маленькие гвоздики, на которых можно подвешивать грузы. Вес каждого отдельного грузика 50 *Г*.

В случае, изображённом на рисунке 82, на диск действуют три силы: $F_1 = 50$ *Г* с плечом $l_1 = 4$ *см*; $F_2 = 200$ *Г* с плечом

$l_2 = 2$ *см*; $F_3 = 100$ *Г* с плечом $l_3 = 6$ *см*. Моменты этих сил равны соответственно:

$$M_1 = 50\ Г \cdot 4\ см = 200\ Г \cdot см$$
$$M_2 = 200\ Г \cdot 2\ см = 400\ Г \cdot см$$
$$M_3 = 100\ Г \cdot 6\ см = 600\ Г \cdot см.$$

Из чертежа видно, что моменты сил $F_2$ и $F_1$ положительные, а момент силы $F_3$ отрицательный.

Диск под действием указанных сил находится в равновесии.

Положительные моменты в сумме дают 600 $Г \cdot см$ и отрицательный момент тоже равен 600 $Г \cdot см$.

Этот опыт показывает, что ***тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если сумма всех положительных моментов равна сумме всех отрицательных или если алгебраическая сумма моментов всех действующих на тело сил равна нулю.***

В нашем примере $M_1 + M_2 + M_3 = 200\ Г \cdot см + 400\ Г \cdot см + + 600\ Г \cdot см = 0$.

**44. Сложение параллельных сил.** Рассмотрим теперь, чему равна равнодействующая двух параллельных сил, действующих на тело, и как найти точку приложения её. Обратимся

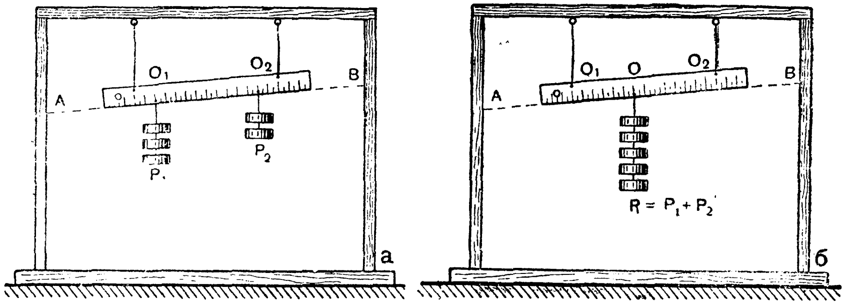



Рис. 83. а) линейка под действием двух сил $P_1$ и $P_2$; б) линейка занимает то же положение под действием силы $R$—равнодействующей сил $P_1$ и $P_2$.

к опыту. Подвесим линейку с делениями на двух резиновых жгутиках (рис. 83,*а*) и нагрузим её в какой-нибудь точке $O_1$ грузом $P_1$, а в точке $O_2$—грузом $P_2$. Тогда к линейке окажутся приложенными две параллельные силы $P_1$ и $P_2$, направленные вертикально вниз. Под действием этих сил резиновые жгутики растянутся неодинаково и линейка займёт некоторое определённое положение, например, такое, как на рисунке 83,*а*. Отметим это положение линейки нитью *AB* и снимем грузы.

Возьмём теперь груз $R = P_1 + P_2$. Можно найти на линейке такую точку *O*, при подвешивании к которой груза *R* линейка вновь займёт отмеченное положение ***AB*** (рис. 83,*б*). Следовательно, сила *R* производит такое же действие, как две параллельные силы $P_1$ и $P_2$, т. е. сила *R* является равнодействующей этих двух параллельных сил.

Пусть $OO_1 = l_1$ и $OO_2 = l_2$ (рис. 83,*б*). Измерив расстояния $l_1$ и $l_2$, найдём, что они обратно пропорциональны силам $P_1$ и $P_2$, т. е.

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{P_1}{P_2}.$$

Таким образом: 1) ***Равнодействующая двух параллельных сил, направленных в одну сторону, равна их сумме, параллельна им и направлена в ту же сторону; 2) точка приложения равнодействующей двух параллельных сил делит расстояние между точками приложения этих сил на части, обратно пропорциональные силам.***

Любое число параллельных сил, направленных в одну сторону, складывая попарно, мы можем свести к двум силам, равнодействующая которых легко находится. Из этого следует, что ***равнодействующая любого числа параллельных сил, направленных в одну сторону, равна их сумме.***

**44а. Разложение силы на две параллельные составляющие.** В предыдущем параграфе был рассмотрен вопрос о сложении параллельных сил. Во многих случаях приходится решать обратную задачу: разложение заданной силы на параллельные составляющие. Рассмотрим это на конкретном примере.

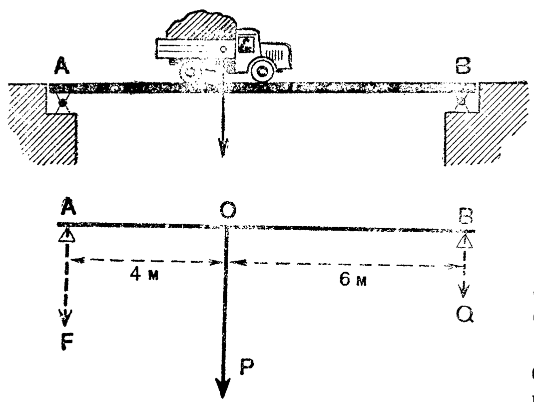



Рис. 84. Разложение силы тяжести автомашины.

На рисунке 84 изображён мост, на котором стоит автомобиль. Пусть автомобиль давит на мост с силой 3200 *кГ*.

Требуется определить силы, которые действуют на опоры моста *A* и *B*, если вес моста не принимать в расчёт.

Изобразим силу 3200 *кГ* вектором *P* (см. нижний рисунок), точка *O*—точка приложения силы *P*. Задача сводится к разложению силы *P* на две параллельные составляющие ***F*** и *Q*; *A* и *B*—точки приложения этих сил.

Нам уже известно, что точка приложения (*O*) равнодействующей двух параллельных сил делит расстояние между точками приложения составляющих сил на части, обратно пропорциональные составляющим силам, т. е.

$$\frac{F}{Q} = \frac{OB}{OA}.$$

Пусть $OB = 6$ *м*, $OA = 4$ *м*; тогда $\frac{F}{Q} = \frac{3}{2}$, откуда $F = 1{,}5Q$. Так как $P = F + Q$, а $P = 3200$ *кГ*, то можно написать, что $1{,}5Q + Q = 3200$, откуда $Q = 1280$ *кГ* и $F = 1920$ *кГ*.

*Упражнение 28.*

1. К концам палки длиной в 50 *см* приложены две параллельные силы: 60 *кГ* и 40 *кГ*. Найти их равнодействующую и точку её приложения.
2. К стержню длиной 100 *см* приложены параллельные силы: у левого конца стержня 2 *кГ*, в середине 3 *кГ* и у правого конца 9 *кГ*. Найти равнодействующую и точку её приложения.
3. На двух опорах $A$ и $B$ лежит балка длиной 5 *м*, к которой подвешен груз в 4 *Т*. Определить, какие силы действуют на опоры, пренебрегая весом балки, если расстояние от опоры $A$ до точки подвеса груза равно 2,6 *м*.

**45. Центр тяжести.** Всякое тело можно разделить на большое число частей. На каждую такую часть действует сила тяжести, направленная вертикально вниз (рис. 85,*а*). Эти силы можно считать параллельными. Следовательно, на любое тело действует очень много параллельных сил, сил тяжести его частиц. Величина равнодействующей всех этих сил тяжести равна весу тела.

Точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на отдельные части тела, называется центром тяжести тела.

На рисунке 85 центр тяжести тела обозначен буквой $C$.

Следовательно, можно сказать, что ***центром тяжести называется точка приложения веса тела.***

При всевозможных перемещениях тела (рис. 85, *б*, *в*, *г*) положение его центра тяжести остаётся неизменным.

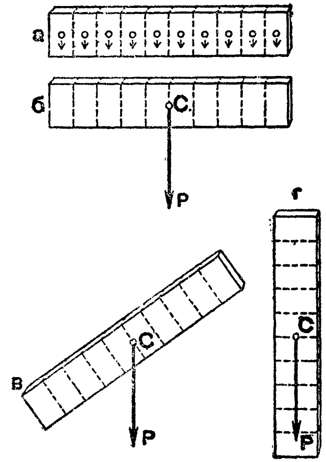


Рис. 85. Центр тяжести тела.

Положение центра тяжести может измениться лишь при изменении относительного расположения частей тела.

Как же найти положение центра тяжести в различных телах? Рассмотрим несколько простейших случаев. Нам уже известно, что уравновешивающая нескольких сил действует по той же прямой, как и равнодействующая их, но в противоположную сторону (§ 40).

Отсюда следует, что *уравновешивающая веса тела должна быть всегда направлена по вертикали вверх.* Поэтому, если подвесить тело за какую-либо его точку (или подпереть), то в случае равновесия его центр тяжести окажется на той же вертикали, на какой находится точка подвеса.



Рассмотрим, как можно определить положение центра тяжести однородного тела.

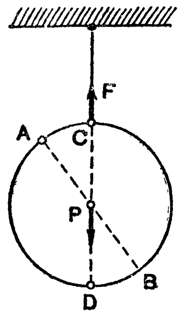


Рис. 86. Определение центра тяжести однородного диска.

Однородным называется тело, любые равные объёмы которого имеют одинаковый вес.

Мы знаем, что при равновесии подпёртого в одной точке или подвешенного тела алгебраическая сумма моментов всех сил тяжести, действующих на тело, равна нулю (см. § 43).

Поэтому центр тяжести однородного стержня лежит на его середине. Центр тяжести однородного диска лежит в его геометрическом центре.

Проверим это на опыте. Прикрепим к какой-либо точке диска нитку. Подвесим на этой нитке диск. На диск действуют две силы: сила упругости нити $F$, направленная вертикально вверх (рис. 86), и вес диска $P$. Так как диск находится в равновесии, то центр тяжести его лежит на линии, являющейся продолжением нити. Эта линия совпадает с диаметром диска $CD$, на котором находится точка приложения силы $P$.

Если теперь подвесить тот же диск за какую-нибудь другую точку $A$, то в этом случае центр тяжести будет лежать на диаметре диска $AB$. Следовательно, центр тяжести находится на пересечении этих двух диаметров, т. е. в геометрическом центре диска.

Так же можно убедиться, что центр тяжести однородной тонкой пластинки, имеющей форму параллелограма, находится в точке пересечения диагоналей. Центр тяжести однородного параллелепипеда находится также в точке пересечения его диагоналей.

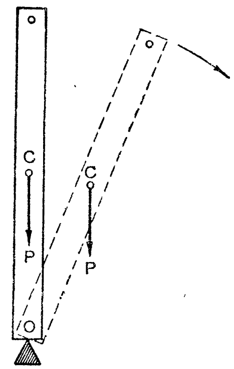


Рис. 87а. Неустойчивое равновесие линейки.

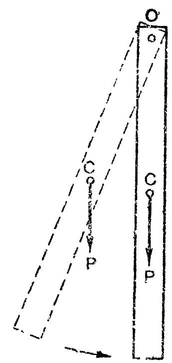


Рис. 87б. Устойчивое равновесие линейки.

Пользуясь приёмом подвешивания, мы можем на опыте найти центр тяжести любого плоского тела.

**46. Виды равновесия.** Рассмотрим, при каких условиях тело, имеющее точку опоры, под действием собственного веса находится в равновесии.

Обратимся к опыту. Возьмём линейку и подопрём её в одной точке так, как показано на рисунке 87а. Если направление силы тяжести (т. е. вертикальная прямая, проведённая из центра тяжести $C$) пройдёт через точку опоры $O$, то линейка будет в равновесии; она не будет вращаться вокруг точки $O$ потому, что плечо силы тяжести (веса линейки) равно нулю.

Удержать линейку в равновесии в этом положении нелегко, ибо при малейшем отклонении центр тяжести линейки понижается и момент силы тяжести становится не равным нулю, линейка опрокидывается. Такое равновесие называется **неустойчивым**.

Вернуться в положение неустойчивого равновесия тело само не может. Для этого нужно воздействие других тел.

Вставим в отверстие на конце линейки карандаш и, держа его в горизонтальном положении, предоставим линейку самой себе. Линейка придёт в состояние равновесия (рис. 87б). При выводе линейки из этого состояния равновесия центр тяжести линейки **повышается**. Если теперь опять предоставить линейку самой себе, то вращающий момент силы тяжести приведёт её обратно в состояние равновесия. Такой вид равновесия называется **устойчивым**.

Изменяя положение центра тяжести, цирковая артистка сохраняет равновесие при ходьбе по канату (рис. 87в).

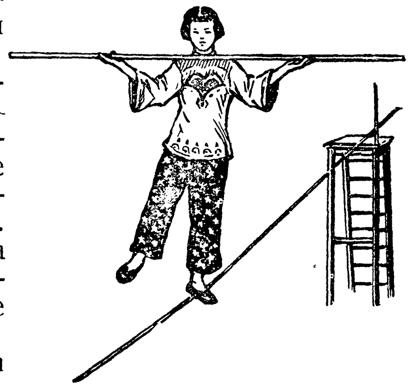


Рис. 87в. Цирковая артистка сохраняет равновесие на канате.

Если при перемещении тела центр тяжести остаётся на одном и том же уровне, то такое равновесие называется **безразличным**.

В безразличном равновесии, например, находится шар, лежащий на горизонтальной подставке, и любое тело, ось вращения которого проходит через центр тяжести.

**47. Устойчивость.** Мы рассмотрели равновесие тел, имеющих точку опоры, или ось вращения. Фабричная труба, здания, многие предметы нашего обихода опираются на некоторую площадь. Рассмотрим, при каких условиях такого рода тела находятся в равновесии. Для этого возьмём какое-нибудь цилиндрическое тело и проделаем с ним опыт. Положение такого тела мы можем менять по нашему усмотрению и, таким образом, на опыте изучить условия равновесия тела, опирающегося на некоторую площадь.

Наклоним слегка тело, оно вновь вернётся в своё прежнее положение. Наклоняя тело всё больше и больше, мы добьёмся того, что оно, наконец, опрокинется и займёт горизонтальное положение.



На рисунке 88 представлены четыре положения такого цилиндра.

В положении I цилиндр вертикален и находится в равновесии. Вертикальная прямая, проведённая из центра тяжести $C$ цилиндра, проходит через площадь опоры. В положении II цилиндр слегка наклонён, вертикаль из точки $C$ вновь проходит через площадь опоры. Сила тяжести $P$ цилиндра в этом положении имеет момент $Pl_1$ относительно точки опоры $O$, возвращающий цилиндр в прежнее положение.

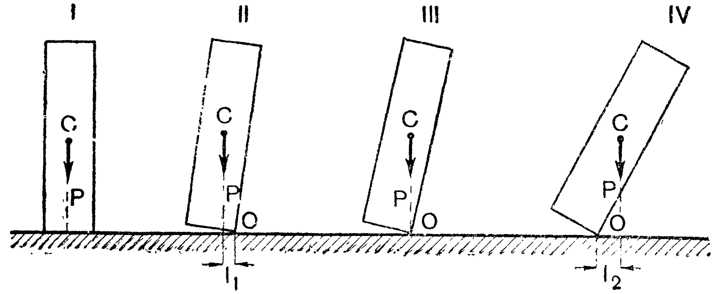



Рис. 88. Цилиндр на горизонтальной плоскости в различных положениях.

В положении III вертикаль из точки $C$ проходит через точку опоры — цилиндр находится в неустойчивом равновесии. Наконец, в положении IV вертикаль из точки $C$ лежит вне площади опоры и момент $Pl_2$ опрокидывает цилиндр. Вместо того чтобы наклонять цилиндр, мы могли бы наклонять подставку (рис. 89) и убедиться, что до тех пор, пока вертикальная прямая, проведённая из центра тяжести цилиндра, проходит через площадь его опоры, цилиндр не опрокидывается — он устойчив.

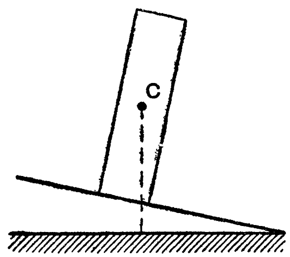



Рис. 89. Цилиндр на наклонной плоскости.

Чтобы опрокинуть вертикально стоящее тело, достаточно довести его до положения неустойчивого равновесия; при этом его центр тяжести поднимется на незначительную высоту. Но для перевода того же тела из горизонтального положения в вертикальное (из одного устойчивого положения в другое) придётся его центр тяжести поднять на бо́льшую высоту; поэтому горизонтальное положение такого тела устойчивее вертикального.

Чем выше центр тяжести тела и меньше площадь его опоры, тем меньше его устойчивость. Поэтому для большей устойчивости или увеличивают площадь опоры, или понижают центр тяжести, применяя тяжёлую опору, или то и другое вместе. Так, например, школьные рычажные весы подвешивают к штативу с большой опорной площадью; высокий школьный штатив имеет тяжёлую чугунную опору достаточной площади; фотографический аппарат при съёмке устанавливают на штативе с раздвижными ножками. Чем больше раздвинуты ножки штатива, тем он устойчивее. По той же причине опоры высокой мачты проводов высокого напряжения ограничивают бо́льшую площадь, чем опоры менее высокой мачты; диаметр нижнего основания фабричной трубы значительно больше верхнего и т. п.

***Упражнение 29.***

1. Почему удобнее нести два ведра с водой, чем одно?
2. Почему человек, несущий на спине тяжесть, наклоняется вперёд?
3. Почему воз с сеном менее устойчив, чем телега без сена?

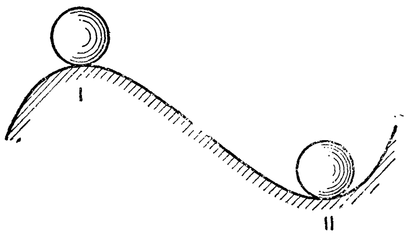



Рис. 90. К упражнению 4.

4. На рисунке 90 изображён однородный шар в двух равновесных положениях. Каково равновесие шара в этих положениях и почему?

Рис. 91. К упражнению 5.

5. Каково равновесие неоднородного шара в положениях, изображённых на рисунке 91 (заштрихованная половина шара изготовлена из более плотного вещества)?

6. В каком положении равновесия находится карандаш на рисунке 92? Почему?

7. Какое положение кирпича, изображённого на рисунке 93. самое устойчивое? Наименее устойчивое? Почему?

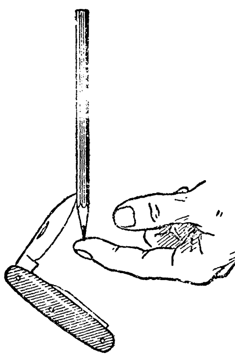


Рис. 92. К упражнению 6.

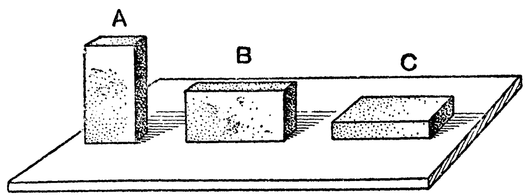



Рис. 93. К упражнению 7.

8. Два шара весом 5 *кГ* и 2 *кГ* скреплены стержнем длиной 60 *см* и весом 1 *кГ*. Радиус большего шара 4 *см*, меньшего 2 *см*. Найти общий центр тяжести.



9. Найти построением центр тяжести однородной пластинки, имеющей форму, показанную на рисунке 94. Толщина пластинки везде одна и та же.

10. Две металлические пластинки, алюминиевая $\left(d=2{,}7\,\frac{Г}{см^3}\right)$ и медная $\left(d=8{,}9\,\frac{Г}{см^3}\right)$, скреплены так, как показано на рисунке 95. Размеры пластинок одинаковые. Найти их общий центр тяжести.

11. В однородном диске радиуса $R$ вырезали отверстие радиусом $\frac{R}{2}$, как показано на рисунке 96. Найти центр тяжести оставшейся части диска.

12. К длинному плечу рычага подвешен груз в 2 *кГ*, а к короткому — в 3 *кГ*. Рычаг под действием этих сил находится в равновесии. Нарушится ли равновесие, если к обоим плечам подвесить дополнительно по 1 *кГ*?

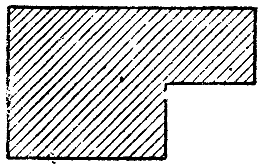


Рис. 94. К упражнению 9.

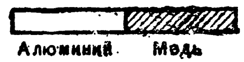



Рис. 95. К упражнению 10.

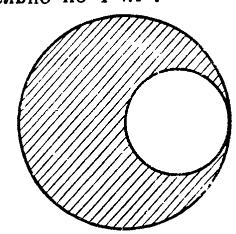


Рис. 96. К упражнению 11.

13. Плечи коромысла весов равны 19,8 *см* и 20 *см*. Весы находятся в равновесии благодаря неодинаковому весу чашек. Для уравновешивания тела, положенного на чашку более длинного плеча, потребовалось положить на другую чашку 85 *Г*. Сколько весит тело?

14. Длина шлакбаума 7,8 *м*, вес его 210 *кГ*. Центр тяжести находится на расстоянии 1,2 *м* от левого конца. Ось вращения находится на расстоянии 6,3 *м* от правого конца. Определить силу, необходимую для опускания шлакбаума, действуя на правый конец.

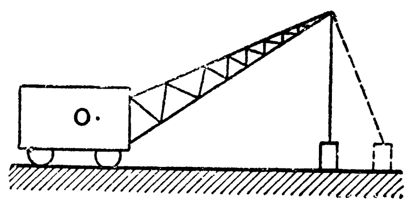



Рис. 97. К упражнению 17.

15. Вес трамбовочного катка 2 *Т*, радиус 50 *см*. Определить горизонтальную силу тяги, необходимую для перетаскивания катка через камень высотой 5 *см*.

16. Дверь высотой 2 *м*, шириной 1 *м* и весом 32 *кГ* подвешена на двух петлях, находящихся на расстоянии 20 *см* каждая от верхнего и нижнего краёв двери. С какой силой дверь тянет верхнюю петлю в горизонтальном направлении?

17. На рисунке 97 схематически изображён кран, поднимающий груз в двух положениях. *O* — центр тяжести крана. При подъёме возникает опасность опрокидывания крана. Почему? В каком из положений груза эта опасность больше? Почему? Когда эта опасность больше — при плавном подъёме или рывком и почему?

ГЛАВА IV

# СИЛА, МАССА И УСКОРЕНИЕ

**48. Масса.** Всякое тело притягивается Землёй. Сила, с которой Земля притягивает тело, называется весом тела. С понятием веса тела тесно связано другое, более общее понятие—масса тела.

***Массой тела называется количество вещества, содержащегося в этом теле.***

Масса литра воды в 1000 раз больше массы 1 $см^3$ воды, масса бревна во много раз больше массы полена из такого же дерева. Словом, массы однородных тел тем больше, чем больше объёмы этих тел. При равенстве их объёмов равны и массы. Так, например, массы двух одинакового объёма кусков железа равны между собой. Если положить эти куски на чашки весов, то они окажутся в равновесии. Это даёт нам возможность измерять массы тел взвешиванием.

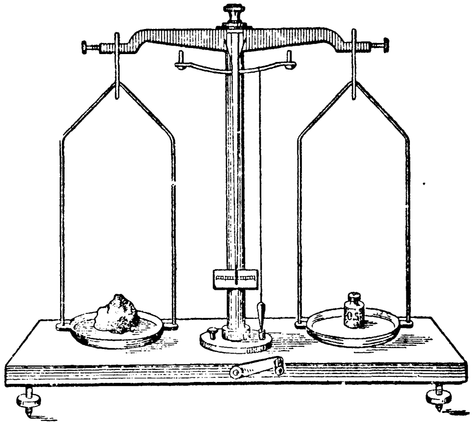


Рис. 98. Измерение массы тела.

Массы двух тел равны, если эти тела одинаково притягиваются Землёй в одном и том же месте, т. е. если они уравновешивают друг друга на чашках рычажных весов. При этом совершенно безразлично, из каких веществ состоят эти тела. Если массу одного из этих тел принять за единицу массы, то и масса другого тела, которое уравновешивается первым, будет также равна единице массы.

*За единицу массы принята масса платинового цилиндра, хранящегося в Севре (близ Парижа). Эта масса называется килограммом.* В отличие от единицы силы, обозначаемой *кГ*, единица массы сокращённо обозначается *кг*.



В физике за единицу массы принимают 0,001 *кг*. Эта единица называется граммом (сокращённое обозначение—*г*).

В практике эталоны масс изготовляют в виде гирь различной величины.

Чтобы измерить массу тела, надо положить на одну чашку весов это тело, а на другую—гири. При равновесии весов масса тела равна массе гирь. На рисунке 98 показано, что масса тела равна 0,5 *кг*.

**49. Второй закон Ньютона.** Во втором законе Ньютона устанавливается связь между силой, действующей на тело, массой тела и ускорением, с которым движется это тело.

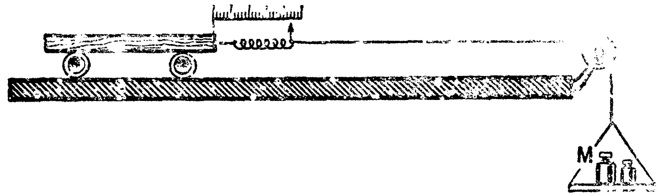



Рис. 99. Прибор для установления зависимости ускорения от силы, действующей на тело.

Рассмотрим сначала, как зависит ускорение одного и того же тела от величины силы, действующей на тело. Проделаем следующий опыт (рис. 99). К тележке, которая может (с малым трением) двигаться по столу, прикреплён динамометр. К другому концу динамометра прикреплена нитка с грузом $M$, переброшенная через блок. По показаниям динамометра мы сможем определить силу, действующую на тележку. Пользуясь капельницей, отметим пути, пройденные тележкой при ускоренном движении за различные промежутки времени под действием постоянной силы. Измерения показывают, что пути эти пропорциональны квадратам времён. Таким образом, ***движение под действием постоянной силы есть равноускоренное движение.***

Измерив длину пройденного тележкой пути за какой-нибудь промежуток времени $t$, по формуле $s=\frac{at^2}{2}$ определяем ускорение $a$.

| Сила | Ускорение |
|---|---|
| $F$ | $a$ |
| $1,5\ F$ | $1,5\ a$ |
| $2,0\ F$ | $2,0\ a$ |
| $2,5\ F$ | $2,5\ a$ |
| $3,0\ F$ | $3,0\ a$ |

Будем подвешивать к концам нити различные грузы, каждый раз измеряя динамометром силу и вычисляя соответствующее этой силе ускорение тележки.

Результаты таких измерений и вычислений отражены в таблице.

Из таблицы видно, что с увеличением силы в 1,5 раза ускорение увеличивается тоже в 1,5 раза; если сила увеличивается в 2 раза, в 2 раза увеличивается и ускорение, и т. д., т. е. *ускорение тележки прямо пропорционально силе, действующей на тележку.*

Математически это можно записать в виде формулы:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2}. \qquad (1)$$

Чтобы установить, как зависит ускорение от массы тела, будем действовать на тележку какой-нибудь постоянной силой. Нагружая тележку гирями, изменим массу движущихся тел. Ускорение, получаемое тележкой, будем вычислять так же, как и в первом случае.

| Масса тела | Ускорение |
|---|---|
| $m$ | $a$ |
| $2\ m$ | $^1/_2\ a$ |
| $3\ m$ | $^1/_3\ a$ |
| $^1/_2\ m$ | $2\ a$ |
| $^1/_3\ m$ | $3\ a$ |

Результаты опытов снова занесём в таблицу. Данные таблицы показывают, что при неизменной силе увеличение массы тела в два раза приводит к уменьшению ускорения в два раза, и наоборот, при уменьшении массы в два раза ускорение увеличивается в два раза, и т. д., т. е. *ускорение тележки с грузами обратно пропорционально их общей массе.* Математически этот вывод можно выразить формулой:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (2)$$

Итак, результаты опытов показывают, что ***ускорение, с которым движется тело, пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорционально массе этого тела.***

Кроме того, ускорение тела совпадает с этой силой по направлению.

Этот вывод, как показал Ньютон, имеет всеобщий характер; он носит название второго закона Ньютона.

Во втором законе Ньютона говорится о действии одной силы. Но практически на тело всегда действуют несколько сил. Нам уже известно, что в расчётных целях мы действие нескольких сил можем заменить действием одной силы — равнодействующей. Поэтому в случае, когда на тело действуют несколько сил, под силой, вызывающей ускорение тела, подразумевается их равнодействующая.

Второй закон Ньютона математически можно выразить в виде следующей формулы:

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



***Величина силы равна произведению массы тела на ускорение.***

Таким образом, второй закон Ньютона позволяет вычислить величину силы, если известна масса тела и ускорение, с которым оно движется.

В частности, на основании второго закона Ньютона вес тела $P$ можно выразить через массу этого тела $m$ и ускорение свободного падения $g$:

$$P = mg.$$

Из сопоставления формулы $F = ma$ и $P = mg$ видно, что

$$\frac{a}{g} = \frac{F}{P},$$

т. е. ускорение движения тела под действием некоторой силы во столько же раз больше или меньше ускорения свободного падения, во сколько раз действующая сила больше или меньше веса тела.

При решении задач с помощью указанного выше отношения однородные величины должны быть выражены в одних и тех же единицах.

**Пример.** Санки с седоком весят 70 *кГ* и скатываются с горы с ускорением $1\ \frac{м}{сек^2}$. Определить силу, движущую санки.

$P = 70\ кГ;$

$g = 9{,}8\ \frac{м}{сек^2};$

$a = 1\frac{м}{сек^2};$

$F = ?$

Из формулы $\frac{a}{g} = \frac{F}{P}$ определим $F$:

$$F = P\frac{a}{g}; \quad F = 70\ кГ\ \frac{1\ \frac{м}{сек^2}}{9{,}8\ \frac{м}{сек^2}} \simeq 7{,}1\ кГ.$$

***Упражнение 30.***

1. Ответить, не прибегая к расчётам по формуле: а) с каким ускорением движется тело, если действующая на него сила в 2,7 и 14 раз меньше веса? б) Во сколько раз вес тела больше действующей на него силы, если тело движется с ускорением $0{,}98\ \frac{м}{сек^2}$? $0{,}49\ \frac{м}{сек^2}$? $0{,}14\ \frac{м}{сек^2}$?

2. На покоящуюся вагонетку весом 350 *кГ* действуют с силой в 7 *кГ*. Сопротивление трения 2 *кГ*. Определить: а) с каким ускорением движется вагонетка; б) путь, пройденный вагонеткой в течение первых 10 сек. движения; в) среднюю скорость за это время; г) скорость в конце десятой секунды.

**50. Масса — мера инертности тела.** Первый закон Ньютона утверждает, что всякое тело обладает свойством инерции, иначе говоря, всякое тело инертно. Какова мера инертности тела? Обратимся к следующему примеру.

Пусть по горизонтальному пути с одинаковой скоростью движутся два вагона, один пустой, другой гружёный. Пусть на каждый из них одновременно начали действовать одинаковые силы, тормозящие их движение. Какой из этих вагонов будет дольше сохранять своё движение? Опыт показывает, что гружёный вагон будет двигаться дольше, следовательно, можно сказать, что он обладает и большей инертностью. Но масса гружёного вагона больше массы пустого; отсюда следует, что ***чем больше масса тела, тем более оно инертно.***

Рис. 100. Масса наковальни значительно больше массы молота.

Этот вывод непосредственно вытекает из второго закона Ньютона. Действительно, по второму закону Ньютона $a=\frac{F}{m}$, т. е. ускорение обратно пропорционально массе, а так как масса гружёного вагона больше массы пустого, то и ускорение его движения будет меньше (ускорение направлено против движения). Следовательно, гружёный вагон дольше будет сохранять своё движение.

Итак, ***масса тела является мерой его инертности.***

Из второго закона Ньютона $a=\frac{F}{m}$ следует, что любая сколь угодно малая сила может вызвать ускоренное движение тела. Не противоречит ли этому то, что мы иногда, толкая тяжёлый предмет, не можем сдвинуть его с места? Нисколько не противоречит. Дело в том, что между предметом и полом существует трение, и нам, чтобы привести его в движение, надо



преодолеть это трение, а для этого сила, с которой мы толкаем предмет, должна быть больше силы трения, что не всегда бывает.

Изменение скорости тела зависит от массы тела и от времени действия силы на тело. Это видно хорошо на следующем опыте.

Положим на одну чашку весов тяжёлую плиту и уравновесим её гирями или каким-нибудь другим грузом. Если резко ударить небольшим молоточком по плите, то равновесие весов не нарушится.

Если же положить на чашки весов тела с малой массой, то уже при самом незначительном ударе равновесие весов нарушится.

Чем больше масса тела, тем меньшее изменение скорости вызывает действующая на него сила. Это учитывается в тех-

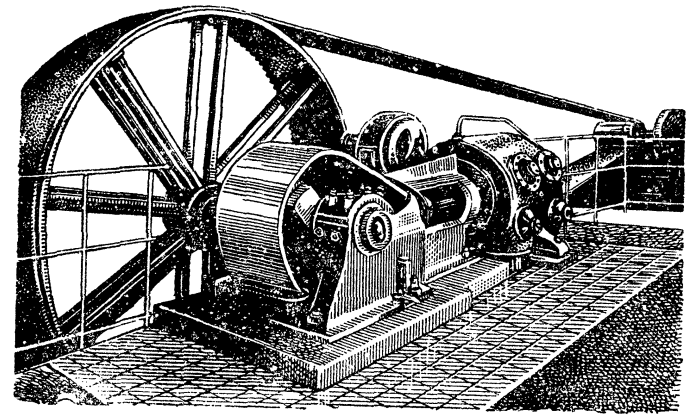


Рис. 101. Машина на массивном фундаменте.

нике. Так, например, для уменьшения сотрясений от ударов делают массивными и прочно соединяют с землёй мостовые „быки" и упоры; массивными делают наковальни: относительные размеры молота и наковальни видны на рисунке 100. По этой же причине станки и машины делают массивными и устанавливают их на массивные фундаменты. На рисунке 101 изображена машина, установленная на массивном основании.

Нам известен способ определения массы тела с помощью взвешивания тела на рычажных весах. Второй закон Ньютона даёт нам другой способ определения массы — как меры инертности тела по величине силы и ускорению:

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

Опытом проверено, что оба эти способа определения массы тела (по весу и по инертности) дают совершенно одинаковые результаты.

**51. Система единиц измерения механических величин.** Чтобы применять формулы для числовых расчётов, необходимо установить, в каких единицах измеряются физические величины.

Физические законы связывают физические величины определёнными зависимостями. Поэтому если произвольно выбрать единицы для измерения некоторых величин, то единицы для измерения других величин получатся на основе соответствующих законов. Например, в формуле $s = vt$ дана зависимость между тремя величинами. Если мы произвольно выберем единицы каких-нибудь двух величин, то единица третьей величины определится из этого уравнения. Условившись, например, измерять путь в метрах, а время в секундах, мы должны будем измерять скорость в $\frac{м}{сек}$.

Зависимости, существующие между физическими величинами, дают возможность составить такую совокупность единиц, в которой для измерения механических величин достаточно выбрать произвольно три единицы: единицу длины, единицу массы, или силы, и единицу времени; такая совокупность единиц называется системой единиц.

Выбранные произвольно единицы системы называются основными единицами, а все другие — производными единицами.

В физике принята система единиц, в которой основными единицами являются: единица длины — 1 *см* (сотая часть международного метра), единица массы — 1 *г* (тысячная часть международного килограмма) и единица времени — 1 *сек* $\left(\frac{1}{86400}\right.$ средних солнечных суток, измеряемая весьма точными часами, которые систематически проверяются астрономическими наблюдениями)[1].

Эта система называется системой единиц *CGS* (по первым буквам слов — сантиметр, грамм, секунда).

Единица скорости в этой системе $1\frac{см}{сек}$ $\left(v = \frac{s}{t}\right)$, единица ускорения $1\frac{см}{сек^2}\left(a = \frac{v}{t}\right)$.

Полагая в формуле $F = ma$ второго закона Ньютона $m = 1$ *г*, $a = 1\frac{см}{сек^2}$, получим единицу силы в системе *CGS*:

$$1 г \cdot 1\frac{см}{сек^2} = 1\frac{г\,см}{сек^2}.$$

[1] Солнечные сутки — промежуток времени между двумя следующими друг за другом полуднями. Так как продолжительность солнечных суток в разные времена года несколько различна, то в практику введены средние солнечные сутки, продолжительность которых равна средней длительности суток за год.



*За единицу силы в системе CGS принимается такая сила, под действием которой масса в 1 г движется с ускорением, равным 1* $\frac{см}{сек^2}$. Эта единица называется диной (сокращённо *дн*).

$$1\ дн = 1\frac{г\,см}{сек^2}.$$

В системе единиц, применяемой в настоящее время в СССР при электрических и магнитных измерениях, за основные единицы принимаются:

единица длины — 1 *м*,
единица массы — 1 *кг*,
единица времени — 1 *сек*,
единица тока — 1 ампер.

Сокращённо мы эту систему единиц будем называть *MKSA* (по первым буквам слов — метр, килограмм, секунда, ампер).

*Единицей силы в системе MKSA будет такая сила, под действием которой масса в 1 кг движется с ускорением* $1\frac{м}{сек^2}$. Эта единица называется ньютон (сокращённо *н*). Таким образом,

$$1\ н = \frac{1\ кг\ м}{сек^2}.$$

Вычислим, сколько в одном ньютоне содержится дин.

$$1\ н = 1\frac{кг\ м}{сек^2} = 1\frac{1000\ г \cdot 100\ см}{сек^2} = 100\,000\frac{г\ см}{сек^2}, \quad или\ 1\ н = 10^5\ дн.$$

В практике довольно широко распространена так называемая техническая система единиц. В этой системе основными единицами являются:

единица длины — 1 *м*,
единица силы — 1 *кГ*,
единица времени — 1 *сек*.

Единица массы в этой системе единиц является производной и может быть определена из равенства $m = \frac{F}{a}$, т. е. *единицей массы в технической системе единиц является масса, которая под действием силы в 1 кГ движется с ускорением 1* $\frac{м}{сек^2}$.

Сокращённое обозначение этой единицы — *т. е. м.* Таким образом,

$$1\ т.\,е.\,м. = \frac{1\ кГ}{1\frac{м}{сек^2}} = 1\frac{кГ\ сек^2}{м}.$$

Между различными единицами массы и силы существуют следующие соотношения:

1 *кГ* есть сила, с которой Земля притягивает массу в 1 *кг* и сообщает ей ускорение $g = 980{,}665\frac{см}{сек^2}$. Отсюда:

$$1\ кГ = 1000\ г \cdot 980{,}665\frac{см}{сек^2} = 980\,665\ дн, \text{ или округлённо: }$$
$$1\ кГ = 980\,000\ дн = 9{,}8 \cdot 10^5\ дн.$$

Так как 1 *н* = $10^5$ *дн*, то 1 *кГ* = 9,8 *н*.

$$1\ т.е.м. = 1\frac{кГ\ сек^2}{м} = \frac{9{,}8\cdot 10^5\ г\frac{см}{сек^2}\cdot сек^2}{100\ см} = 9800\ г = 9{,}8\ кг.$$

***Упражнение 31.***

1. Какая из двух сил: 200 000 *дн* и 2 *кГ* больше и во сколько раз?

2. Масса одного тела 5 *кг*, а другого 5 *т. е. м.* Масса какого тела больше и во сколько раз?

3. Масса трактора ЧТЗ равна 11 200 *кг*. Выразить эту массу в технических единицах массы с точностью до единицы.

4. Ковш шагающего экскаватора вмещает 14 $м^3$ грунта. Полагая удельный вес грунта равным $2\ \frac{Г}{см^3}$, вычислить вес поднимаемого грунта за один раз в тоннах, *кГ* и динах.

## 52. Примеры решения задач на второй закон Ньютона.

1. Постоянная сила, равная 2 *кГ*, действует на тело, вес которого 19,6 *кГ*. С какой скоростью будет двигаться тело в горизонтальном направлении по прошествии 5 сек., если начальная скорость движения равна нулю?

Расчёты ведём в системе *CGS*.

Дано: $F = 2\ кГ = 2\cdot 980\,000\ дн = 1\,960\,000\ дн$;

$$m = 19\,600\ г;\quad t = 5\ сек.\ \text{ Найти } v_t.$$

Под действием постоянной силы тело будет двигаться равноускоренно. Скорость этого тела определим по формуле:

$$v_t = at.$$

Время $t$ дано по условиям задачи.

Ускорение найдём на основании второго закона: $a = \frac{F}{m}$.

$$a = \frac{1\,960\,000\ г\ \frac{см}{сек^2}}{19\,600\ г} = 100\ \frac{см}{сек^2}.$$

Ответ. $v = 100\ \frac{см}{сек^2}\cdot 5\ сек. = 500\ \frac{см}{сек}$.

2. Тело весом 98 *кГ* движется со скоростью, равной $420\ \frac{м}{сек}$. Какую силу надо приложить, чтобы остановить это тело в течение 5 мин.? Расчёты провести в технической системе единиц.

Дано: $P = 98\ кГ$; $v_0 = 420\ \frac{м}{сек}$; $t = 300\ сек$. Найти $F$.

Искомую силу найдём на основании второго закона:

$$F = ma.$$



Под действием этой силы тело будет двигаться равнозамедленно, отрицательное ускорение его $a$ определим по формуле:

$$v_t = v_0 - at.\ \text{ Так как } v_t = 0, \text{ то}$$

$$v_0 = at \text{ и } a = \frac{420\frac{м}{сек}}{300\ сек} = 1{,}4\ \frac{м}{сек^2}.$$

По второму закону Ньютона $P = mg$, откуда

$$m = \frac{98\ кГ}{9{,}8\ \frac{м}{сек^2}} = 10\ кГ\frac{сек^2}{м}.$$

Ответ. $F = 10\ \frac{кГ\ сек^2}{м}\cdot 1{,}4\frac{м}{сек^2} = 14\ кГ.$

3. На тело, движущееся с начальной скоростью в $10\frac{м}{сек}$, подействовали силой в 10 *Г* в направлении движения, после чего тело прошло за 5 сек. путь в 200 *м*. Определить вес тела. Расчёты провести в системе *CGS*.

Вес тела в системе *CGS*, выражаемый в динах, найдётся на основании второго закона Ньютона:

$$P = mg;\quad g = 980\ \frac{см}{сек^2}.$$

Надо найти массу в граммах. Для этого воспользуемся тем же вторым законом: $m = \frac{F}{a}$; ускорение $a$ по условиям задачи вычислим по формуле:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2};\ 20\,000\ см = 1000\frac{см}{сек}\cdot 5\ сек + \frac{a\,25\ сек^2}{2},$$

откуда

$$a = \frac{40\,000\ см - 10\,000\ см}{25\ сек^2} = 1200\ \frac{см}{сек^2}.$$

Масса тела

$$m = \frac{9800\ \frac{г\ см}{сек^2}}{1200\ \frac{см}{сек^2}} \simeq 8\ г.$$

Ответ. $P = 8\ г\cdot 980\ \frac{см}{сек^2} = 7840\ г\ \frac{см}{сек^2} = 7840\ дн.$

При решении физических задач мы производим математические действия не только с числовыми значениями величин, но и над их наименованиями. Если предварительно все величины, указанные в задаче, выразить в единицах одной системы единиц и правильно применить соотношения, существующие между физическими величинами, то ответ всегда получится в единицах этой системы. Это позволяет нам не загромождать вычисления наименованиями единиц; достаточно указать наименование величины только в окончательном результате.

Пример. Тело массой 0,01 *кг*, двигаясь равноускоренно без начальной скорости, за 1 мин. прошло в горизонтальном направлении путь, равный 18 *м*. Определить силу, действующую на тело.

Дано: $m = 0{,}01$ *кг*; $t = 1$ мин.; $s = 18$ *м*. Найти $F$.

Выражаем все данные в задаче величины в единицах одной системы, например в системе $CGS$.

$$m = 10\ г;\ t = 60\ сек.;\ s = 1800\ см.$$

По второму закону Ньютона $F = ma$. (1)

Масса дана, ускорение $a$ находим по формуле пути равноускоренного движения: $s = \frac{at^2}{2}$, откуда $a = \frac{2s}{t^2}$. (2)

Подставим значение $a$ из равенства (2) в равенство (1), получим:

$$F = m\frac{2s}{t^2}. \quad (3)$$

Подставляя численные значения величин в равенство (3), определим величину силы $F$:

$$F = \frac{10 \cdot 2 \cdot 1800}{3600} = 10\ дн.$$

***Упражнение 32.***

1. Знаменитый итальянский учёный эпохи Возрождения Леонардо да Винчи высказал следующие положения:

а) Если сила $F$ продвинет тело $m$ за время $t$ на расстояние $s$, то та же сила продвинет тело с половинной массой в то же время на двойное расстояние.

б) Или та же сила продвинет половинную массу на то же расстояние в половинное время.

в) Или та же сила продвинет двойную массу на то же расстояние в двойное время.

г) Или половинная сила продвинет половинную массу на то же расстояние в то же время.

д) Или половинная сила продвинет всё тело на половинное расстояние в то же время.

Верны ли эти положения?

2. Показать, что первый закон Ньютона находится в полном соответствии со вторым законом Ньютона.

3. Показать, что пути, проходимые в одно и то же время двумя телами, пропорциональны действующим силам, если массы тел равны, и обратно пропорциональны массам, если действующие на них силы равны.

4. Какую силу нужно приложить к телу, масса которого 1 *кг*, чтобы оно стало двигаться с ускорением $5\frac{см}{сек^2}$?



5. Под действием силы 500 *дн* тело движется с ускорением $0{,}2\frac{м.}{сек^2}$. Определить массу тела.

6. С каким ускорением будет двигаться тело, масса которого 0,1 *кг*, под действием силы 2 *Г*?

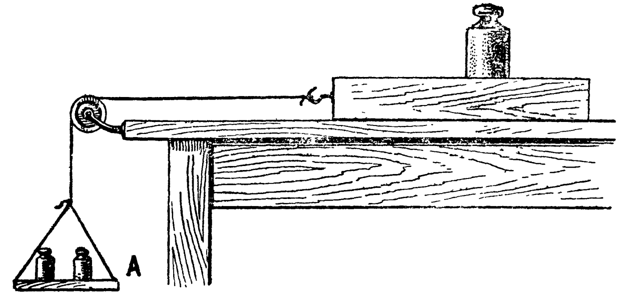



Рис. 102. К упражнению 10.

7. Тело, масса которого 100 *г*, начиная двигаться равноускоренно, в течение 4 сек. проходит 80 *см*. Определить величину силы, действующей на тело, если сила трения равна 2000 *дн*. Какая потребуется сила, чтобы тело, пройдя указанное расстояние, продолжало двигаться дальше равномерно?

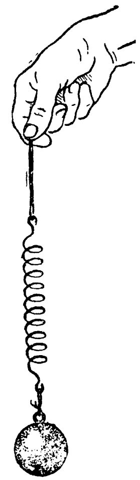


Рис. 103. К упражнению 14.

8. Через блок перекинута нить, на которой подвешены два груза по 240 *Г* каждый. На один из грузов кладут перегрузок в 10 *Г*. Определить расстояние, пройденное этим грузом в течение 3 сек.

9. Тело, вес которого 49 000 *дн*, под действием силы начинает двигаться равноускоренно и, пройдя 50 *см*, движется со скоростью $0{,}72\frac{км}{час}$. Определить силу, действующую на тело.

10. Брусок (рис. 102) вместе с грузом весит 5 *кГ*. Когда чашка *А* с грузами весит 2 *кГ*, брусок движется по горизонтально установленной доске с ускорением $20\frac{см}{сек^2}$. Определить силу трения.

11. Автомобиль весом в 1 400 *кГ* начинает двигаться с ускорением $0{,}7\frac{м}{сек^2}$. Сопротивление движению составляет 0,02 веса автомобиля. Определить силу тяги, развиваемую двигателем.

12. После удара футболиста мяч весом 700 *Г* движется со скоростью $14\frac{м}{сек}$. Определить среднюю силу удара, если удар длился 0,02 сек.

13. Поезд, вес которого 490 *Т*, затормозили, когда он шёл со скоростью $36\frac{км}{час}$, после чего он, пройдя 200 *м*, остановился. Предполагая движение

поезда от начала торможения до остановки равнозамедленным, определить тормозящую силу.

14. Как будет изменяться деформация пружины, если её с грузом (рис. 103) двигать с ускорением вертикально вверх? вертикально вниз? Объяснить.

15. К гирьке весом 500 *Г* привязана нить, которая может выдержать натяжение 520 *Г*. Выдержит ли нить, если, потянув её за конец вертикально вверх, попытаться заставить гирьку двигаться с ускорением 60 $\frac{см}{сек^2}$?

16. На пружинных весах подвешен груз в 14 *кГ*. Какой вес покажут они, если двигать их вертикально вверх с ускорением в 28 $\frac{см}{сек^2}$? Если двигать вниз с тем же ускорением? Если двигать вверх и вниз с ускорением в 490 $\frac{см}{сек^2}$?

Какой вес покажут весы, если они вместе с подвешенным грузом будут свободно падать?

17. Подъёмный кран поднимает груз 980 *кГ*, лежащий на земле, с ускорением 1 $\frac{м}{сек^2}$, направленным вертикально вверх. Определить силу, действующую на стальной канат крана в момент отрыва груза от земли.

# ГЛАВА V

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

**53. Третий закон Ньютона.** Сила в механике характеризует действие одного тела на другое. Когда мы говорим, например, что на тело действует сила, то это значит, что на это тело действует какое-то другое тело. Но во всех случаях, когда одно тело действует на другое, имеется не одностороннее действие, а взаимодействие тел. Это значит, что если одно тело действует на другое, то это другое тело действует на первое.

Проверить только что высказанное утверждение можно на опытах.

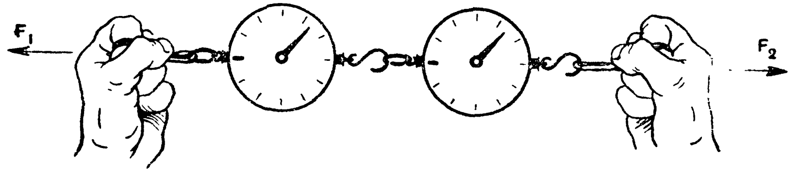


Рис. 104. Динамометры показывают одну и ту же величину силы.

На рисунке 104 изображён опыт с двумя динамометрами, соединёнными друг с другом; за кольцо одного динамометра тянут в одну сторону, за кольцо другого — в противоположную сторону. Оба динамометра показывают одну и ту же величину силы. Следовательно, силы $F_1$ и $F_2$ равны по величине и противоположны по направлению.

Сила $F_1$ приложена к одному динамометру, а сила $F_2$ — к другому. Опыт показывает, что растянуть пружину первого динамометра до какого-нибудь деления можно только в том случае, когда и пружина второго динамометра растянута на то же деление.

Рассмотрим ещё случай, когда тела взаимодействуют, находясь на некотором расстоянии друг от друга, не прикасаясь друг к другу; так взаимодействуют электрически заряженные тела и магниты.

Положим на одну тележку магнит, а на другую — кусок железа (рис. 105). Сзади тележек прикрепим динамометры. Вследствие притяжения между магнитом и железом тележки будут двигаться навстречу друг другу, растягивая при этом пружины динамометров. Когда же они остановятся, то оба динамометра покажут одну и ту же величину силы. На основании этого

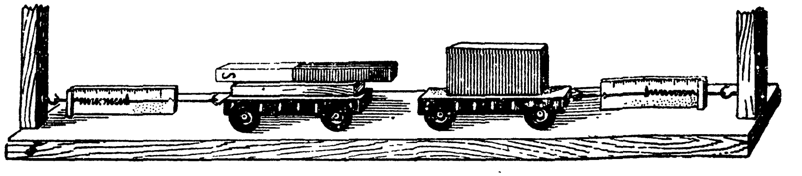


Рис. 105. Динамометры показывают одну и ту же величину силы.

опыта мы можем сказать, что с какой силой магнит притягивает железо, с такой же силой (по величине) железо притягивает магнит.

Мы рассмотрели случаи взаимодействия покоящихся тел. Рассмотрим теперь взаимодействие движущихся тел.

На рисунке 106 изображены два мальчика, стоящие на тележках. В руках у них верёвка. Когда мальчики натянут верёвку, то оба они вместе с тележками начнут двигаться навстречу друг другу. Силы, которые при этом приложены к мальчикам, оказываются всегда равными и противоположнонаправленными, независимо от того, как мальчики натягивают верёвку. Действительно, измерив пути, пройденные тележками, и время движения их, можно убедиться, что ускорения $a_1$ и $a_2$ движения тележек с мальчиками обратно пропорциональны движущимся массам $m_1$ и $m_2$, т е.

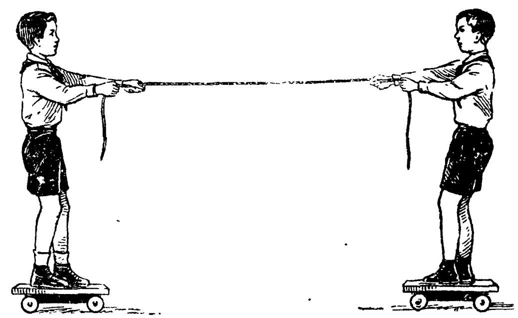


Рис. 106. Пример взаимодействия двужущихся тел.

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}, \text{ или } m_1a_1 = m_2a_2. \text{ Но } m_1a_1 = F_1 \text{ и } m_2a_2 = F_2.$$

Значит, по величине $F_1 = F_2$ (1), причём не следует забывать, что сила $F_1$ приложена к одной тележке, а $F_2$—к другой. Направлены эти силы в противоположные стороны. Учитывая противоположные направления взаимодействующих сил $F_1$ и $F_2$, равенство (1) надо написать следующим образом: $F_1 = -F_2$ (2).

Итак, во всех случаях ***силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по величине и противоположны по направлению.***



Если одну из этих сил назвать действующей силой, то другая будет противодействующей.

Такое разделение сил на действующие и противодействующие является условным; от нас зависит, какую из этих сил назвать действующей, какую противодействующей.

Сформулированный выше закон равенства действия и противодействия открыт был Ньютоном и положен им в основу динамики в качестве третьего закона движения.

Из третьего закона следует, что не только Земля притягивает, например, камень, но и камень притягивает к себе Землю с силой, равной весу камня. В результате этого взаимодействия оба тела — Земля и камень—движутся навстречу друг другу (относительно, например, неподвижных звёзд) с ускорениями, обратно пропорциональными их массам.

Так как масса Земли во много-много раз больше массы любого камня, то практически ускорение движения её по направлению к камню равно нулю. Камень же движется по направлению к Земле (падает) с ускорением $g = 980 \frac{см}{сек^2}$.

При ходьбе мы отталкиваемся ногами от Земли. Земля толкает нас в противоположную сторону. Так как масса Земли велика по сравнению с массой нашего тела, то практически Земля остаётся неподвижной, мы же движемся с некоторой скоростью. Ноги человека и животных, ведущие колёса автомобиля и паровоза при движении отталкиваются от Земли, гребной винт парохода—от воды, птица и винт самолёта при полёте—от воздуха и т. п. Во всех таких случаях отталкивающее и отталкиваемое тела начинают двигаться в противоположных направлениях с ускорениями, обратно пропорциональными их массам.

Чтобы правильно применять третий закон Ньютона, не следует забывать, что ***силы действия и противодействия,*** о которых говорится в этом законе, ***всегда равны и противоположно направлены, но никогда друг друга не уравновешивают, так как приложены к разным телам.***

Если лошадь везёт телегу, то это не значит, что сила, с которой она тянет телегу, больше силы, с которой телега тянет лошадь в противоположную сторону. Силы эти равны по величине. Но ни лошадь, ни телега, вследствие одного только взаимодействия друг с другом, не могут прийти в движение обе в одном и том же направлении.

Для этого необходима третья сила, приложенная одновременно и к лошади, и к телеге. Такая сила возникает при взаимодействии лошади с Землёй. Лошадь подковами отталкивает Землю в одну сторону, а Земля толкает лошадь с телегой в другую.

Точно так же двигатель автомобиля, вращая колёса автомобиля, не сдвинет его с места, если отсутствует достаточное сцепление колёс автомобиля с полотном дороги (§ 38).

**53а. Сила тяги.** Согласно третьему закону Ньютона, силы взаимодействия между двумя телами равны по величине и противоположны по направлению. Эти силы не могут привести в движение оба взаимодействующих тела в одном и том же направлении. Например, одни лишь силы взаимодействия между паровозом и вагонами не могут привести поезд в движение. Для этого необходима третья сила. Такой третьей силой, как уже указывалось (§ 38), является сила трения между ведущими колёсами паровоза и рельсами. Вопрос этот очень хорошо изложен в книге нашего замечательного учёного В. Л. Кирпичёва „Беседы о механике". Выдержка из этой книги приводится:

„Давление пара в паровой машине представляет внутреннюю силу и не может вызвать перемещение центра тяжести поезда. Это подтверждается опытом, который неоднократно делали с паровозами: паровоз подвешивают на цепях и, растопив котёл, пускают машину в ход. Оказывается, что вследствие хода поршня взад и вперёд получаются лишь небольшие качания всей остальной массы в обратном направлении, а центр тяжести паровоза остаётся неподвижным.

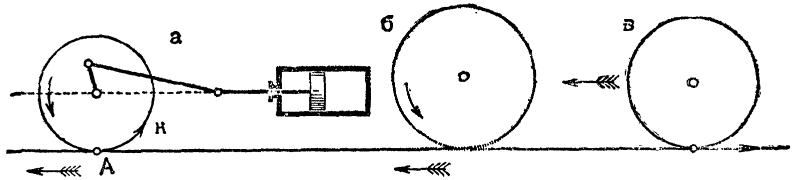


Рис. 107.

Когда паровоз поставлен на рельсы и машина его пущена в ход, то между его ведущими колёсами и рельсами возникает трение, которое и есть горизонтальная сила, необходимая для движения паровоза с поездом. Явление это состоит в следующем. При вращении колеса, стоящего на рельсе (рис. 107, *а*), точка *A* стремится скользить по рельсу по направлению стрелки *K*, но этому мешает трение между колесом и рельсом; направление силы трения показано оперённой стрелкой.

Колесо своими неровностями и шероховатостями упирается в рельс и испытывает от рельса обратное давление. Эти шероховатости колеса и рельса представляют как бы миниатюрные зубцы (рис. 107, *б*), между которыми происходит упор и получается давление. Вот это обратное давление, т. е. трение, передающееся от рельса на колесо, и есть та внешняя сила, которая перемещает центр тяжести паровоза. Она должна преодолеть сопротивление состава вагонов, прицепленных к паровозу, т. е. должна быть больше этого сопротивления. Поэтому для перемещения поезда требуется значительное трение между ведущими колёсами и рельсом, а трение пропорционально давлению, следовательно, необходимо, чтобы ведущие колёса производили значительное давление на рельс. Другими словами, для того чтобы вести тяжёлый поезд, требуется тяжёлый паровоз.

Всё это относится к ведущим колёсам паровоза, т. е. к тем, на которые действует поршень паровой машины, вращающий их. Та часть веса паровоза, которая передаётся на эти колёса, есть полезный груз: чем он больше, тем, сильнее паровоз, т. е. тем более тяжёлый поезд он может вести. Кроме ведущих, в паровозе есть поддерживающие колёса, т. е. не соединённые с паровой машиной. Часть веса паровоза, передающаяся на эти колёса, не приносит никакой пользы, т. е. не увеличивает силу тяги паровоза. Эти колёса не дают движущей силы, а, напротив того, сами приводятся в движение так же, как колёса вагонов. Когда поезд идёт по направлению оперённой стрелки (рис. 107, *в*), то трение рельсов о колёса вращает их. Это трение на вагонных колёсах или на поддерживающих колёсах паровоза направлено в сторону, противоположную движению; оно представляет внешнюю силу, сопротивляющуюся движению поезда.



Итак, движущая сила паровоза представляет собой силу трения его ведущих колёс о рельсы. Мы увеличиваем эту силу тем, что увеличиваем вес паровоза. Если такое средство недостаточно, то можно прибегнуть к другому, на которое можно смотреть как на увеличение трения. Рельс делают зубчатым, и с ним сцепляется стальное зубчатое колесо, сидящее на оси паровоза, т. е. вместо миниатюрных зубцов, имеющихся вследствие шероховатости колеса и рельса, ставят крупные железные и стальные зубья. Такое устройство применяют в горных паровозах, которые должны подниматься по крутым уклонам.

Обратно, всякое уменьшение трения сейчас же уменьшает силу тяги паровоза; это случается, например, при обледенении рельсов. Сила тяги паровоза также обратилась бы в нуль, если бы мы его поставили не на рельсы, а на катки, свободно вращающиеся на своих осях".

Рассмотрим теперь, как можно рассчитать силу тяги паровоза.

Вес той части паровоза, который приходится на ведущие колёса, называется **сцепным весом**.

Между ведущими колёсами и рельсами существует, как уже указывалось, сила трения скольжения. Коэффициент трения скольжения стальных бандажей колёс паровоза по стальным рельсам равен примерно $^1/_6$. Поэтому сила тяги паровоза составляет одну шестую часть сцепного веса паровоза.

$$F_{\text{тяга}} = k_{\text{скольж.}} \cdot P_0, \quad \text{где } P_0 \text{ — сцепной вес.}$$

При скорости движения $20 - 40 \frac{км}{час}$ сопротивление железнодорожного состава катанию может быть принято равным примерно 1/300. Следовательно, по горизонтальному пути паровоз может тянуть за собой поезд, вес которого в 300 раз превышает силу тяги паровоза, а так как сила тяги паровоза составляет $^1/_6$ сцепного веса паровоза, то вес поезда (включая паровоз) при строгой горизонтальности пути в 50 раз превышает сцепной вес паровоза.

Но даже незначительная крутизна пути сильно уменьшает тягу паровоза. Так, например, при подъёме в полградуса паровоз серии „Э" весом в 80 *Т* может тянуть поезд весом не более 1500 *Т*.

У тракторов сила тяги в зависимости от характера пути может составлять от $^1/_3$ до $^4/_5$ веса трактора.

Силой тяги лошади, как и в случае паровоза и трактора, является сила трения между подковами лошади и землёй. Величина силы тяги лошади составляет 0,1 — 0,2 её веса. При весе лошади около 400 *кГ* она может развивать тягу от 40 *кГ* до 80 *кГ*. Трение же между колёсами повозки и булыжной мостовой равно примерно $^1/_{20}$ веса повозки. Следовательно, по горизонтальному пути лошадь может тянуть повозку с грузом, вес которых от 2 до 4 раз больше веса лошади.

### *Упражнение 33.*

1. На столе лежит груз. Какие силы действуют на груз? Какие силы действуют на стол?

2. Через два неподвижных блока перекинут шнур, к концам которого подвешены гири по 5 *кг* каждая (рис. 107, *а*). Шнур между блоками разрезали и присоединили к динамометру. Что покажет динамометр?

3. Предположим, что в опыте с тележками (рис. 106) на правую тележку положили такой дополнительный груз, чтобы масса правой тележки оказалась вдвое больше массы левой. Если расстояние между передними краями

тележек до начала движения было равно 2,7 *м*, то какое расстояние пройдёт каждая тележка до встречи (трением пренебречь)?

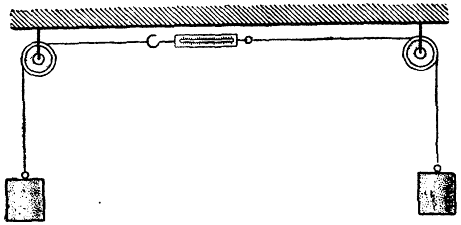


Рис. 107а. К упражнению 2.

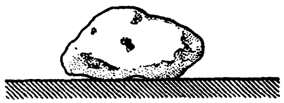


Рис. 108. К упражнению 4*а*.

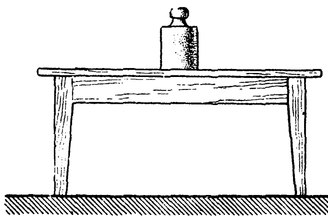


Рис. 109. К упражнению 4*б*.

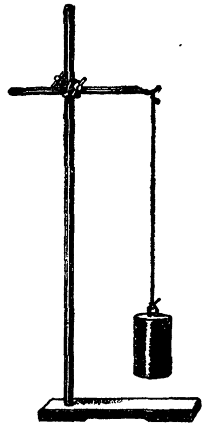


Рис. 110. К упражнению 4*в*.

4. В следующих примерах какие силы вы назовёте действующими и какие противодействующими:

а) На горизонтальной поверхности земли лежит камень (рис. 108).

б) На горизонтальном полу стоит стол и на горизонтальной его поверхности покоится груз (рис. 109).

в) На верёвке подвешен груз (рис. 110).

г) Через неподвижный блок, прикреплённый к потолку (рис. 111), перекинута верёвка, к концам которой подвешены два равных груза.

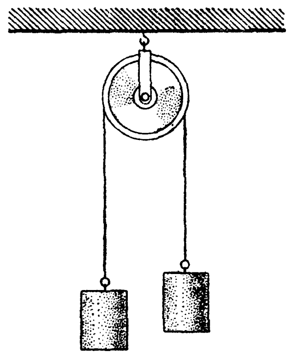


Рис. 111. К упражнению 4*г*.

5. На горизонтальном гладком столе лежат два бруска $A$ и $B$, соединённые нитью. Масса каждого бруска 1 *кг*. На эти бруски действует сила $F = 40\,000$ *дн*, как показано на рисунке 112.

Не принимая в расчёт трение, определить: а) с каким ускорением движутся бруски; б) какая по величине сила действует на левый брусок в направлении движения; в) с какой силой натянута верёвка; г) какие по величине силы действуют на правый брусок по линии его движения?



6. Паровоз весом 50 *Т*, сцеплённый с двумя вагонами по 20 *Т* каждый начинает двигаться с ускорением $0{,}2\,\frac{м}{сек^2}$. Сопротивление движению составляет 0,005 веса состава. Определить силы, действующие на паровоз и на каждый из вагонов, и силы натяжения в сцеплениях. Чему равнялись бы эти силы, если бы состав двигался равномерно? Считать $g = 10\,\frac{м}{сек^2}$.

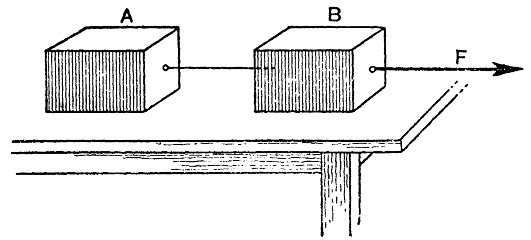



Рис. 112. К упражнению 5.

7. Через неподвижный блок перекинута нить, к концам которой подвешены два груза в 120 и 125 *г*. Определить силы, действующие на каждый груз, и силу натяжения нити.

8. С высоты 5 *м* свободно падает камень весом 600 *Г*. Через сколько секунд камень упадёт на землю? С каким ускорением движется Земля по направлению к камню (относительно, например, Солнца)? В течение какого времени (в годах, считая год равным $3{,}2 \cdot 10^7$ сек.) Земля, двигаясь с таким ускорением, прошла бы путь 0,5 *см*? Масса Земли $6 \cdot 10^{27}$ *г*. Считать $g = 10\,\frac{м}{сек^2}$.

**54. Количество движения. Закон сохранения количества движения.** Для характеристики движения тел почти одновременно с открытием законов динамики в науку была введена физическая величина, называемая **количеством движения**.

*Количеством движения движущегося тела называется произведение массы тела на его скорость* ($mv$).

Количество движения представляет собой векторную величину, имеющую направление скорости.

При взаимодействии тел количество движения от одного тела может передаваться другому. Взаимодействующие тела обмениваются количеством движения.

Проделаем следующий опыт.

Подвесим два одинаковой массы стальных шарика на нитях так, чтобы нити были параллельны и шарики касались друг друга (рис. 113,*а*). Отклоним правый шарик на некоторый угол (рис. 113,*б*) и отпустим его. Ударившись о левый неподвижный шарик, он останавливается, а левый шарик приходит в движение и отклоняется на такой же угол (рис. 113,*в*).

Пусть масса каждого шарика равна $m$ и скорость правого шарика в момент удара $v$. Так как левый шарик до удара покоился, то общее количество движения обоих шариков было равно $mv$ и направлено справа налево. Но левый шарик после удара отклоняется на такой же угол, а следовательно начинает двигаться с такой же скоростью $v$, с какой правый шарик двигался в момент, предшествующий удару. Следовательно, общее количество движения обоих шариков непосредственно после удара равно количеству движения

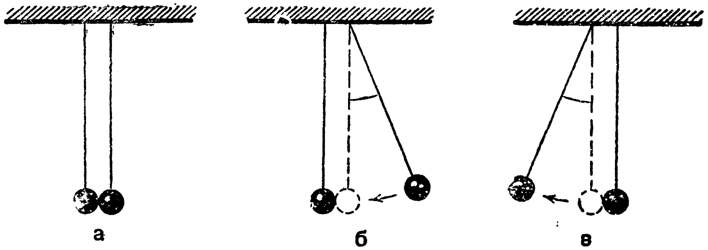


Рис. 113. К закону сохранения количества движения.

до удара. Этот опыт показывает, что *при взаимодействии двух тел сумма их количеств движения не меняется.*

Этот вывод можно получить теоретически, исходя из второго и третьего законов Ньютона.

На рисунке 114 изображены два шара с массами $m_1$ и $m_2$, движущиеся вдоль прямой в одном направлении со скоростями $v_1$ и $v_2$.

Пусть скорость второго шара больше скорости первого, т. е. $v_2 > v_1$. По истечении некоторого времени второй шар

Рис. 114. Два шара движутся в одном направлении с разными скоростями.

нагонит первый. Когда произойдёт столкновение между шарами, возникнут силы взаимодействия, вследствие чего скорости шаров изменятся. Обозначим скорости шаров после взаимодействия буквами $v'_1$ и $v'_2$ и буквой $t$ время взаимодействия шаров.

Ускорения $a_1$ и $a_2$, возникшие у них при взаимодействии, определятся из равенств:

$$a_1 = \frac{v'_1 - v_1}{t};$$

$$a_2 = \frac{v'_2 - v_2}{t}.$$



По второму закону Ньютона силы, действующие на каждый шар, будут соответственно равняться:

$$F_1 = ma_1 = m_1\frac{v'_1 - v_1}{t}; \qquad (1)$$

$$F_2 = ma_2 = m_2\frac{v'_2 - v_2}{t}. \qquad (2)$$

По третьему закону Ньютона силы взаимодействия $F_1$ и $F_2$ равны по величине и противоположны по направлению:

$$F_1 = -F_2. \qquad (3)$$

Подставим в равенство (3) значения $F_1$ и $F_2$ из равенств (1) и (2); получим:

$$m_1\frac{v'_1 - v_1}{t} = -m_2\frac{v'_2 - v_2}{t}.$$

Сокращая на $t$, раскрывая скобки и собирая члены, содержащие скорости, помеченные штрихом, в одну сторону равенства, получим:

$$m_1v'_1 + m_2v'_2 = m_1v_1 + m_2v_2.$$

Полученное соотношение показывает, что ***сумма количеств движения взаимодействующих тел не меняется.***

В этом состоит один из законов природы—з а к о н с о х р а н е н и я к о л и ч е с т в а д в и ж е н и я.

Мы пришли к этому закону из рассмотрения взаимодействия двух тел, но можно было бы показать, что он справедлив для любого числа взаимодействующих тел.

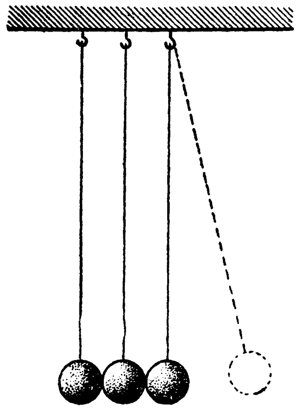


Рис. 115. К упражнению 3.

***Упражнение 34.***

1. Если по неподвижной лодке на воде начать двигаться с кормы на нос, то лодка станет двигаться в противоположном направлении. Объясните, почему.

2. На идеально гладкой горизонтальной поверхности сидит человек. Может ли он передвигаться по этой поверхности? Объясните.

3. На рисунке 115 изображены три стальных шарика одинаковой массы, подвешенные на нитях одинаковой длины так, что шарики касаются друг друга. Если отклонить правый шарик на некоторый угол и отпустить, то он, ударившись о средний шарик, останавливается; при этом отскакивает левый, отклоняясь на такой же угол. Средний шарик остаётся в покое. Объясните этот опыт.

**55. Отдача при выстреле. Реактивные двигатели.** Как известно, при стрельбе получается отдача: снаряд движется вперёд, а орудие откатывается назад. Снаряд и орудие— два взаимодействующих тела. Для определения скорости, с которой откатывается орудие, можно применить закон сохранения количества движения. Покажем это на примере.

Какую скорость вследствие отдачи получает орудие при выстреле, если масса орудия 1000 *кг*, масса снаряда 2,5 *кг*, а скорость его в момент вылета из ствола орудия $600 \frac{м}{сек}$?

До выстрела снаряд и орудие были в покое, сумма их количеств движения равнялась нулю. По закону сохранения

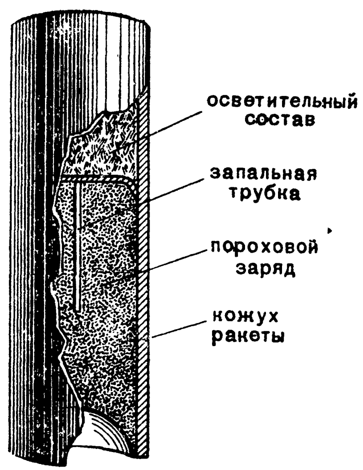



Рис. 116. Разрез сигнальной ракеты.

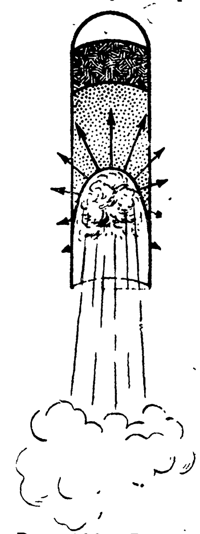


Рис. 116а. Ракета в полёте.

количества движения и после выстрела общее количество движения должно остаться равным нулю. Следовательно, можно написать

$$1000\ кг \cdot v \frac{м}{сек} + 2,5\ кг \cdot 600 \frac{м}{сек} = 0,$$

откуда

$$v = -\frac{2,5\ кг}{1000\ кг} \cdot 600 \frac{м}{сек} = -1,5 \frac{м}{сек}.$$

Знак минус показывает, что направление скорости орудия противоположно направлению скорости снаряда.

Старинные орудия действительно откатывались при выстреле. При современных же тяжёлых снарядах и огромных их скоростях приходится снабжать орудие специальными механизмами, тормозящими его откатку. К числу таких механизмов относятся воздушные, масляные или пружинные компрессоры.

В современной артиллерии при отдаче откатывается только ствол орудия, лафет же остаётся на месте. Откатывающийся при выстреле ствол сжимает пружину или связанным



с ним поршнем давит на жидкость, сжимающую воздух в особом резервуаре. После выстрела сжатая пружина или воздух приводит ствол орудия в прежнее положение. В автоматическом оружии отдача используется для перезарядки.

Отдачу можно использовать и так, что „орудие“ при этом получит значительную скорость. Таким образом используется отдача во всех так называемых реактивных двигателях.

Принцип действия реактивного двигателя можно проследить на устройстве обычной сигнальной ракеты.

На рисунке 116 показан разрез такой ракеты. Она состоит из трубки, в нижней части которой имеется смесь пороха с угольной пылью, а в верхней—осветительный состав. Порох зажигается фитилём и благодаря примеси угольной пыли не сразу взрывается, а горит в течение нескольких секунд.

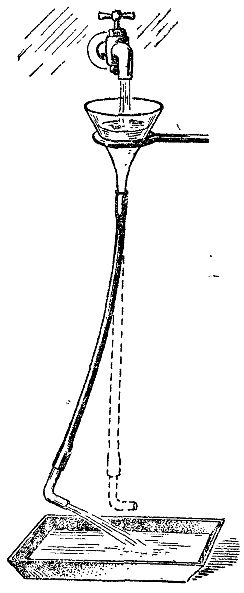


Рис. 117. Реакция вытекающей струи.

Пороховые газы, являющиеся в данном случае своеобразными „снарядами“, выбрасываются с большой скоростью через нижний конец трубки. Сама трубка—„орудие“ со всем содержимым—под действием давления пороховых газов получает скорость, направленную вверх (рис. 116а).

Этот же принцип лежит в основе движения снарядов, которыми заряжаются прославившиеся в Великой Отечественной войне гвардейские миномёты „катюши“.

В настоящее время имеются самолёты с реактивными двигателями, развивающие скорость в $1200 \frac{км}{час}$ и выше.

Впервые мысль о возможности полёта по принципу ракеты была высказана русским революционером Кибальчичем в 1881 г., незадолго до его казни.

Ракеты для полёта, работающие на жидком топливе, впервые были предложены и разработаны знаменитым русским учёным Циолковским в 1903 г. Циолковским была разработана и теория реактивного движения.

Реактивное действие оказывает не только струя газа, но и струя жидкости. В этом можно убедиться на опыте.

На штативе укрепим воронку с резиновой трубкой. Конец резиновой трубки наденем на изогнутую стеклянную трубку (рис. 117). Закроем изогнутую трубку пробкой и наполним воронку водой. Если теперь, вынув пробку, дать воде возможность вытекать, то резиновая трубка отклонится в сторону, противоположную направлению струи. Одновременно с силой давления, выталкивающей воду из трубки, появляется сила, толкающая трубку в противоположную сторону. Эта сила называется **реакцией** вытекающей струи. На рисунке 118 изображено так называемое **сегнерово колесо**, вращающееся вследствие реакции вытекающей струи жидкости. Жидкость, вытекая из трубки, вращает колесо в сторону, противоположную изгибам трубок.

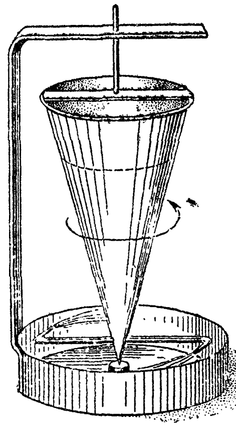


Рис. 118. Сегнерово колесо.

На реактивном действии водяной струи основано устройство мощных водяных турбин, работающих на Днепрогэсе, на Волховской и на многих других гидроэлектростанциях.

***Упражнение 35.***

1. Если рукав шланга присоединить к водопроводной сети и выпускать воду под большим напором, то конец рукава, лежащий на земле, будет двигаться. Объясните, почему.

2. Масса винтовки 4,1 *кг*, масса пули 9,6 *г*. Скорость пули при вылете $865 \frac{м}{сек}$. Определить скорость отдачи винтовки.

**56. Закон всемирного тяготения.** С понятием веса человек знакомится очень рано. Упавшая на пол игрушка, ушибленная рука или нога при падении самым наглядным образом знакомят ребёнка с силой тяжести или весом тела.

Под действием притяжения Земли тела падают, давят на опоры или натягивают нити, которые препятствуют им падать. Мельчайший невидимый глазом атом притягивается Землёй так же, как и любой предмет, который мы можем наблюдать. Опыт нам говорит, что все тела, независимо от их размеров, притягиваются Землёй.

Но является ли тяжесть свойством только земных тел, или она присуща всем телам природы? Будет ли иметь вес тело, находясь на Луне или на какой-либо другой планете?

Ответ на эти вопросы содержится в открытом Ньютоном законе всемирного тяготения, согласно которому:

***две любые частички вещества притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.***

Закон этот был открыт Ньютоном на основании изучения движения Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца и распространён им на все тела природы и на все частицы, из которых состоят эти тела.



Согласно закону всемирного тяготения, каждая частица планеты и планета в целом притягиваются Солнцем, Солнце же притягивается в свою очередь планетой. Луна притягивается Землёй, так же как притягивается любое тело, находящееся на поверхности Земли. Таким образом, *вес тел на Земле обусловлен силой тяготения.*

С помощью закона всемирного тяготения описываются с огромной степенью точности движения небесных тел, а также предсказываются на много лет вперёд солнечные и лунные затмения, что является основной опытной проверкой этого закона.

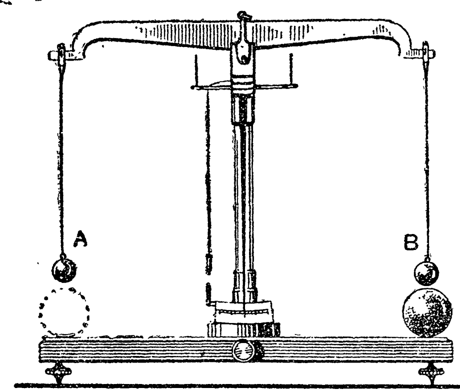



Рис. 119. Определение гравитационной постоянной (схема).

Силы притяжения, существующие между телами, с которыми мы встречаемся в нашей практике, очень малы, непосредственно их даже нельзя обнаружить, но с помощью тонких лабораторных опытов их можно измерить. Один из таких способов измерения силы тяготения мы рассмотрим, но прежде выразим закон всемирного тяготения математической формулой.

Обозначим буквой $F$ силу притяжения между массами $m_1$ и $m_2$, находящимися на расстоянии $r$ друг от друга. Тогда:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}. \qquad (1)$$

Буквой $\gamma$ (греческая гамма) в этой формуле обозначена величина, численно равная силе, с которой притягиваются два тела с массами по 1 *г* каждое, находящиеся на расстоянии 1 *см* одно от другого. Эта величина называется **гравитационной постоянной**. Её можно определить, например, на следующем опыте.

Два свинцовых шара $A$ и $B$ равного веса (приблизительно 20 *кг*) подвешены к коромыслу больших равноплечих весов (рис. 119). Третий шар $C$, вес которого приблизительно в семь раз больше, чем $A$ или $B$, укреплён на вращающемся столике таким образом, что может устанавливаться в точности под центром шара $A$ или $B$. Масса каждого шара и расстояние между центрами шаров $A$ и $C$ (или $B$ и $C$) тщательно измеряются. Если шар $C$ находится под шаром $B$, то вес шара $B$ увеличивается приблизительно на 0,4 *мг*; это и будет величина силы $F$, с которой шары $B$ и $C$ притягиваются друг к другу.

В формуле (1), таким образом, будут известны все величины, кроме гравитационной постоянной, которую теперь легко вычислить.

На основании многих опытов было установлено численное значение гравитационной постоянной:

$$\gamma = \frac{1}{15\,000\,000} \approx 6{,}66 \cdot 10^{-8} \frac{\text{дн}\ \text{см}^2}{\text{г}^2}$$

(если сила измерена в динах, масса—в граммах, а расстояние—в сантиметрах).

Это значит, что *два тела с массами по 1 г, находясь на расстоянии 1 см, притягиваются друг к другу с силой, равной $\frac{1}{15\,000\,000}$ дины.*

**Историческая справка.** Закон всемирного тяготения лежит в основе небесной механики—науки о движении планет. На основе этого закона с огромной точностью вычисляются траектории движения небесных тел и определяются положения их на небесном своде на многие десятки лет вперёд.

Наиболее замечательным случаем применения закона всемирного тяготения является открытие планеты Нептун. В 1781 г. английский астроном Гершель (1738—1822) открыл планету Уран. Была вычислена её орбита и составлена таблица положений этой планеты на ряд лет вперёд. Однако проверка этой таблицы, проведённая в 1840 г., показала, что данные её расходятся с действительностью. Оказалось, что на Уран действует какая-то неизвестная сила, возмущающая его движение. Зная эти отклонения (возмущения Урана), англичанин Адамс и француз Леверье поставили задачу: пользуясь законом всемирного тяготения, найти местоположение неизвестной планеты, которая возмущает его движение. Адамс раньше кончил работу, но наблюдатели, которым он сообщил свои результаты, не торопились с проверкой. Тем временем Леверье, закончив вычисления, указал немецкому астроному Галле место, где надо искать неизвестную планету. В первый же вечер, 23 сентября 1846 г., Галле нашёл эту планету на небесном своде в месте, отстоящем всего на полградуса от положения, указанного Леверье. Эта планета получила название Нептун; она находится за Ураном.

Таким же путём 14 марта 1930 г. была открыта находящаяся за Нептуном планета Плутон.

В законе всемирного тяготения не содержится каких-либо указаний на причину тяготения тел. Сам Ньютон, открывший этот закон, не считал, что частицам вещества присуще какое-то особое свойство притяжения на расстоянии, и допускал существование особой среды, находящейся между частицами вещества, которая является передатчиком притяжения. Ньютон, таким образом, считал невозможным действие одного тела на другое на расстоянии без участия промежуточной среды, разделяющей тела.

**57. Масса и вес тела.** Существуют два способа взвешивания тел: 1) на пружинных весах и 2) на рычажных весах. Оба эти способа принципиально различны.



Если измерять пружинными весами вес одного и того же тела на различных высотах над поверхностью Земли, то можно заметить, что *с увеличением высоты вес тела убывает.*

Это уменьшение веса невелико, но важно то, что оно имеется и является одинаковым для всех тел, а именно: при поднятии на каждый километр вес тела убывает приблизительно на 0,0003 своей величины.

Пользуясь пружинными весами, можно обнаружить также, что *вес тела изменяется в зависимости и от географической широты местности*: по мере приближения к экватору вес тела убывает. Всякое тело, перенесённое с полюса на экватор, уменьшается в весе приблизительно на 0,005 веса на полюсе.

С помощью пружинных весов мы измеряем силу, с которой тело притягивается Землёй, т. е. вес тела. Таким образом, ***вес тела не является величиной постоянной: с изменением местоположения тела его вес изменяется.***

Но если мы будем взвешивать тело на рычажных весах, то в любом месте мы получим всегда один и тот же результат, так как в этом случае будем определять массу тела. Рассмотрим это подробнее.

Пусть массы двух каких-либо тел $m_1$ и $m_2$, а веса этих тел в одном и том же месте на Земле ($g$ одинаково для обоих тел) $P_1$ и $P_2$.

На основании второго закона Ньютона можно написать, что

$$P_1 = m_1 g; \tag{1}$$

$$P_2 = m_2 g. \tag{2}$$

Разделив равенства (1) на (2), получим:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1}{P_2}. \tag{3}$$

***Массы тел пропорциональны их весам.***

Эталон массы 1 *кг* в месте его хранения весит 1 *кГ*, следовательно, численное значение массы какого-либо тела в метрических единицах в месте хранения эталона массы равно численному значению его веса в тех же единицах. В других местах на Земле этого совпадения не будет.

Однако, как видно из сказанного выше, изменение веса с изменением местоположения тела на Земле незначительно; поэтому во многих практических случаях мы можем не считаться с этим изменением. В таких случаях, *независимо от местонахождения тела, мы можем принять численное значение его веса, выраженного в единицах метрической системы, равным численному значению его массы в тех же единицах.* Так, например, если какое-либо тело весит 100 *Г*, то и его масса в граммах тоже будет 100 *г*, и если масса тела 5 *т*, то его вес тоже 5 *Т*, и т. д.

В следующей таблице даны характеристики массы и веса.

| Масса ($m$) | Вес ($P$) |
|---|---|
| 1. Количество вещества, содержащееся в теле. Механически масса проявляется в инертности и весе тела. | 1. Сила, обусловливающая ускорение свободно падающего тела. Вес равен силе, с которой тело давит на неподвижную горизонтальную подставку или растягивает нить, на которой оно подвешено. |
| 2. Величина ненаправленная (скаляр). | 2. Величина направленная (вектор). |
| 3. Величина постоянная для данного тела, не зависящая от его местоположения. | 3. Величина переменная для данного тела, зависящая от местоположения его на Земле. |
| 4. $m = \frac{P}{g}$. | 4. $P = mg$. |

В метрической системе мер единицы массы и веса имеют одинаковые названия.

Чтобы отличить единицы веса от единиц массы, условились обозначать:

| **Единицы массы** | **Единицы веса** |
|---|---|
| 1 *г* (грамм массы) | 1 *Г* (грамм силы) |
| 1 *кг* (килограмм массы) | 1 *кГ* (килограмм силы) |
| 1 *т* (тонна массы) | 1 *Т* (тонна силы) |

**Массы некоторых тел**

| | |
|---|---|
| Атом водорода | $1{,}675 \cdot 10^{-24}$ *г* |
| Молекула воды | $3 \cdot 10^{-23}$ *г* |
| Песчинка | $1 \cdot 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-4}$ *г* |
| Винтовочная пуля | 9,65 *г* |
| Автомобиль „Победа“ (без нагрузки) | 1530 *кг* |
| Автомобиль грузовой ЗИС-150 (без нагрузки) | 3900 *кг* |
| Трактор ДТ-54 | 5400 *кг* |
| Паровоз ФД | 120 *т* |
| Линкор | 25 000—50 000 *т* |

*Упражнение 36.*

1. Один ученик утверждает, что целый кирпич упадёт с некоторой высоты на землю вдвое быстрее, чем полкирпича, так как Земля притягивает его с вдвое большей силой; другой утверждает, что целый кирпич упадёт вдвое медленнее, так как он в два раза более инертен. Кто из них прав? Объяснить. Проверить опытом.

2. а) Если взвесить одно и то же тело на рычажных весах у подножия Эльбруса и на его вершине, то каков будет результат? Одинаков ли вес тела в этих двух местах?

б) На чувствительных пружинных весах взвесили одно тело у подножия, другое на тех же весах на вершине той же горы. Показания весов оказались одинаковыми, одинаковы ли массы этих двух тел?



**58. Удельный вес и плотность.** ***Удельным весом вещества называется величина, измеряемая отношением веса $P$ тела, состоящего из этого вещества, к его объёму $V$.*** Обозначив удельный вес буквой $d$, можем написать:

$$d = \frac{P}{V}.$$

Из этого определения следует, что удельный вес вещества численно равен весу единицы объёма тела[1].

Единицами измерения удельного веса могут быть:

$$1\,\frac{Г}{см^3};\ 1\,\frac{кГ}{дм^3};\ 1\,\frac{Т}{м^3}$$

и т. д.

Наряду с величиной удельного веса в физике пользуются величиной плотности вещества.

***Плотностью вещества называется величина, измеряемая отношением массы тела к его объёму.***

Обозначив плотность буквой $D$, можем написать:

$$D = \frac{m}{V}.$$

Плотность вещества численно равна массе вещества, заключённой в единице объёма тела. Например, 1 $см^3$ ртути имеет массу в 13,6 *г*, следовательно, плотность ртути $13{,}6\,\frac{г}{см^3}$, а в 1 $см^3$ пробки заключена масса всего в 0,24 *г*, следовательно, её плотность $0{,}24\,\frac{г}{см^3}$.

Ниже приведена таблица плотностей некоторых газообразных, жидких и твёрдых веществ в $\frac{г}{см^3}$, $\frac{кг}{дм^3}$ или $\frac{т}{м^3}$.

Газы (при 0° С и давлении 760 *мм* ртутного столба):

| | |
|---|---|
| Водород | 0,00009 |
| Гелий | 0,00018 |
| Азот | 0,00125 |
| Воздух | 0,00129 |
| Кислород | 0,00143 |

Жидкости:

| | |
|---|---|
| Эфир этиловый при 20°С | 0,71 |
| Бензин при 15°С | 0,68—0,70 |
| Спирт этиловый безводный при 18°С | 0,79 |
| Керосин при 15°С | 0,79—0,82 |
| Масло растительное | 0,90—0,93 |
| Вода чистая при 4°С | 1 |
| Вода морская при 15°С | 1,02—1,03 |
| Молоко при 15°С | 1,028—1,032 |

[1] Предполагается, что тело однородно и состоит целиком из рассматриваемого вещества.

Твёрдые тела

| | | | |
|---|---|---|---|
| Ель (сухая) | 0,60 | Олово | 7,2—7,4 |
| Берёза (сухая) | 0,72 | Железо | 7,7—7,8 |
| Дуб (сухой) | 0,80 | Латунь | 8,4—8,5 |
| Лёд | 0,9 | Медь | 8,8—8,9 |
| Магний | 1,74 | Серебро | 10,5 |
| Кирпич | около 1,8 | Свинец | 11,4 |
| Алюминий | 2,6—2,7 | Золото | 19,3 |
| Стекло | 2,5—2,7 | Платина | 21,5 |
| Цинк | 7 | Иридий | 22,4 |

Зная плотность вещества и объём тела, можно определить массу тела:

$$m = DV.$$

Принимая во внимание, что $P = mg = DVg$, подставим это значение веса в выражение удельного веса, получим: $d = Dg$. *Удельный вес вещества равен произведению плотности вещества на ускорение свободного падения.*

Следовательно, соотношение между удельным весом и плотностью такое же, как и между весом тела и его массой. Пользуясь соотношением $d = Dg$, необходимо, как и во всех случаях, все величины выражать в единицах одной системы единиц.

***Упражнение 37.***

1. Определить массу 1 $м^3$ воды, железа и сосны.
2. Найти объём 1 *т* дуба, 1 *кг* пробки и 1 *г* золота.
3. Чему равен удельный вес воды в системе *CGS*?
4. Плотность свинца $11{,}4\frac{г}{см^3}$. Чему равен удельный вес свинца в $\frac{дн}{см^3}$, в $\frac{Г}{см^3}$, в $\frac{кГ}{м^3}$ и в $\frac{Т}{м^3}$?
5. Чему равен удельный вес и плотность воды в системе *MKS*? В технической системе единиц?

**59. Определение массы и плотности Земли.** По закону всемирного тяготения сила взаимодействия двух тел $F = \gamma\frac{m_1 m_2}{r^2}$. Если известна сила $F$, с которой взаимодействуют два тела, и масса $m_1$ одного из этих тел, то, зная расстояние $r$ между ними, можно определить массу $m_2$ второго тела по формуле:

$$m_2 = \frac{Fr^2}{\gamma m_1}. \qquad (1)$$

Тело массой $m_1 = 1$ *г* притягивается к Земле с силой:

$$F = 1\ г \cdot 980\frac{см}{сек^2} = 980\ дн.$$



Расстояние между телом и центром Земли составляет приблизительно:

$$r = 6400 \cdot 10^5\ см, \text{ а } \gamma = \frac{1}{15\,000\,000}\ \frac{дн \cdot см^2}{г^2}.$$

Подставляя числовые значения величин в формулу (1), можем вычислить массу Земли $m_2$:

$$m_2 = \frac{Fr^2}{\gamma m_1} = 980 \cdot 15\,000\,000 \cdot 6400^2 \cdot 10^{10}\ г \approx 6 \cdot 10^{27}\ г.$$

Так как объём Земли $V$ составляет около $1{,}1 \cdot 10^{21}\ м^3$, то средняя плотность Земли приблизительно равна $5{,}5\frac{г}{см^3}$.

Средняя плотность Земли почти вдвое больше средней плотности исследованной части земной коры. Это согласуется с предположением геологов о том, что центральная часть Земли содержит в себе большое количество железа.

Ниже приводятся массы некоторых небесных тел, средние их плотности и ускорения свободного падения на них.

| | Масса (в *г*) | Плотность $\left(в\ \frac{г}{см^3}\right)$ | Ускорение свободного падения $\left(в\ \frac{см}{сек^2}\right)$ |
|---|---|---|---|
| Земля | $5{,}98 \cdot 10^{27}$ | 5,5 | 980 |
| Луна | $7{,}34 \cdot 10^{25}$ | 3,3 | 160 |
| Марс | $6{,}43 \cdot 10^{26}$ | 3,8 | 360 |
| Солнце | $1{,}99 \cdot 10^{33}$ | 1,4 | 27 500 |

## ИЗ КНИГИ НЬЮТОНА „МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ"

*Перевод с латинского акад. А. Н. КРЫЛОВА*

### Аксиомы или законы движения

*Закон I*

*Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние.*

Брошенное тело продолжает удерживать своё движение, поскольку его не замедляет сопротивление воздуха и поскольку сила тяжести не побуждает это тело вниз. Волчок, коего части, вследствие взаимного сцепления, отвлекают друг друга от прямолинейного движения, не перестаёт вращаться (равномерно), поскольку это вращение не замедляется сопротивлением воздуха. Большие же массы планет и комет, встречая меньшее сопротивление в свободном пространстве, сохраняют своё как поступательное, так и вращательное движение в продолжение гораздо большего времени.

*Закон II*

*Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.*

Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила произведёт двойное, тройная—тройное, будут ли они приложены разом все вместе, или же последовательно и постепенно. Это количество движения, которое всегда происходит по тому же направлению, как и производящая его сила, если тело уже находилось в движении, при совпадении направлений прилагается к количеству движения тела, бывшему ранее, при противоположности вычитается, при наклонности прилагается наклонно и соединяется с бывшим ранее сообразно величине и направлению каждого из них.

*Закон III*

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

Если что-либо давит на что-нибудь другое или тянет его, то оно само этим последним давится или тянется. Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и, обратно (если можно так выразиться), она с равным усилием оттягивается к камню, ибо натянутый канат своей упругостью производит одинаковое усилие на лошадь в сторону камня и на камень в сторону лошади, и насколько этот канат препятствует движению лошади вперёд, настолько же он побуждает движение вперёд камня. Если какое-нибудь тело, ударившись в другое тело, изменяет своей силой его количество движения на сколько-нибудь, то оно претерпит от силы второго тела в своём собственном количестве движения то же самое изменение, но обратно направленное, ибо давления этих тел друг на друга постоянно равны. От таких взаимодействий всегда происходят равные изменения не скоростей, а количеств движения, предполагая, конечно, что тела никаким другим усилиям не подвергаются. Изменения скоростей, происходящие также в противоположные стороны, будут обратно пропорциональны массам тел, ибо количества движения получают равные изменения. Этот закон имеет место и для притяжений, как это будет доказано в поучении.

# ГЛАВА VI

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

**60. Введение.** В жизни человека работа и энергия играют исключительно важную роль. Обе эти величины тесно связаны между собой. Чтобы могли, например, работать на наших фабриках и заводах разнообразные станки и машины, их должны приводить в движение электродвигатели, которые при этом расходуют электрическую энергию. Автомобили и самолёты работают за счёт энергии сгорающего бензина, паровозы и паровые турбины при работе расходуют энергию, заключённую в угле и нефти, гидротурбины работают за счёт энергии падающей с высоты воды. Да и сами мы, чтобы существовать и работать, должны возобновлять запас своей энергии.

Слова „работа“ и „энергия“ в обыдённой жизни нередко употребляются в ином, более широком смысле, чем в науке. Так, например, работой мы обычно называем разнообразные виды деятельности человека, в том числе и умственную, причём о величине работы судим не только по её результатам, но иногда по времени, которое на неё затрачиваем, а нередко и по степени утомления, которое она производит на наш организм. Понятие работы и тесно связанное с работой понятие энергии в механике у́же, но зато определённее. С этими понятиями более подробно мы и познакомимся в последующих параграфах.

**61. Работа.** Передвигая тележку, поднимая груз, забивая гвоздь или растягивая пружину, мы совершаем механическую работу, или просто работу.

Рассмотрим, чем характеризуется работа.

Прилагая силу, мы двигаем тележку, поднимаем груз, перемещаем гвоздь или концы растягиваемой пружины.

*Нет перемещения—нет и работы.* Так, например, если груз, висящий на верёвке, неподвижен, то сила тяжести, действующая на него, работы не совершает. При падении же груза сила тяжести совершает работу.

С другой стороны, если тело движется по инерции, не встречая сопротивлений, то работа также не совершается.

Следовательно, *если нет приложенной к телу силы—нет и работы.*

Таким образом, *механическая работа представляет собой процесс движения тела под действием приложенной к телу силы.*

Во всех движущихся механизмах действуют силы, которые совершают работу. В цилиндре паровой машины, например, сила давления пара совершает работу, передвигая поршень, сила тяги буксирного парохода совершает работу, передвигая баржу; работу совершает и сила, развивающаяся при ударе „бабы“ копра, вгоняя в грунт сваю.

В разных случаях работа силы, очевидно, различна. Вполне естественно считать, что чем больше сила и чем больше расстояние, на которое переместилась точка приложения силы, тем больше будет и работа. Например, чем тяжелее груз и больше высота, на которую мы его поднимем, тем больше будет совершаемая работа.

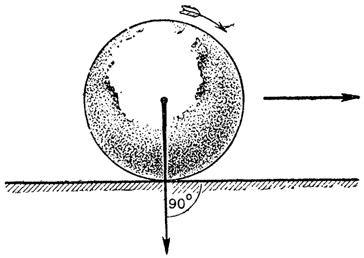



Рис. 120. Сила тяжести горизонтально катящегося шара работы не совершает.

***За величину работы принимается произведение силы на путь, пройденный по направлению силы.***

Если обозначить работу буквой $A$, силу — буквой $F$ и путь через $s$, то можно написать, что

$$A = Fs.$$

Эта формула применима в том случае, когда сила $F$ постоянна и её направление совпадает с направлением пути $s$.

Если направление силы совпадает с направлением движения, то работа $A=Fs$ является положительной величиной. Сила $F$ в этом случае будет называться движущей силой. Если же движение происходит в направлении, противоположном направлению действия силы, то работа будет отрицательной: $A = -Fs$. Сила $F$ в этом случае будет называться силой сопротивления.

Итак, *работа движущей силы положительна, работа силы сопротивления отрицательна.*

На рисунке 120 изображён шар, который катится по горизонтальному столу. Сила тяжести $P$, действующая на шар, перпендикулярна направлению движения шара. В направлении силы тяжести шар не движется, следовательно, сила тяжести работы не совершает.

Вообще *когда направление действующей на тело силы перпендикулярно направлению движения, то работа такой силы равна нулю.*



Рассмотрим теперь более общий случай работы, когда направление силы составляет с направлением движения произвольный угол $\alpha$. Два таких случая представлены на рисунках 121 и 122.

Пусть, например, сила $F$ (рис. 123) образует с направлением перемещения угол $\alpha$. Разложим эту силу на две составляющие:

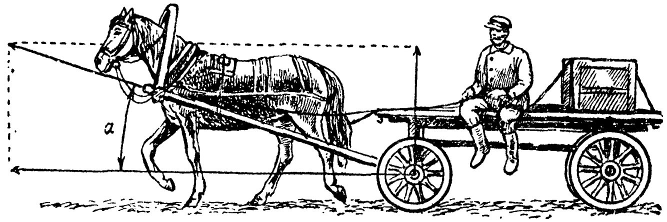



Рис. 121. Направление силы составляет с направлением движения угол $\alpha$.

$F_1$, направленную перпендикулярно перемещению, и $F_2$ по направлению перемещения. Работа равнодействующей силы $F$

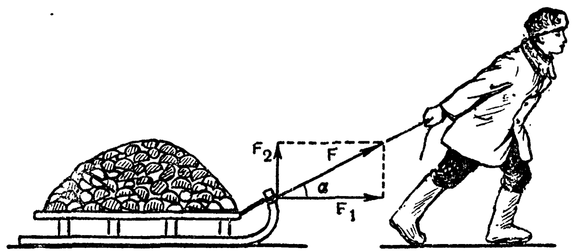



Рис. 122. Направление силы составляет с направлением движения угол $\alpha$.

равна сумме работ составляющих сил $F_1$ и $F_2$. Если тело прошло путь $s$, то работа силы $F_1$, совпадающей с направлением перемещения, равна $F_1s$; работа же силы $F_2$ равна нулю, так как никакого перемещения в направлении этой силы не происходит.

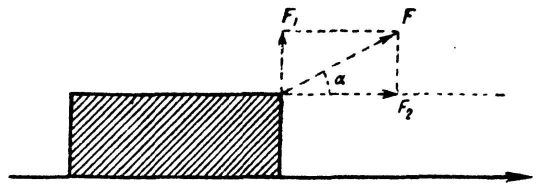



Рис. 123. К выводу формулы работы.

Таким образом, работа силы $F$ равна $F_2s$: $A = F_2s$. Но $F_2 = F\cos\alpha$, следовательно,

$$A = Fs\cos\alpha.$$

Итак, в общем случае ***величина работы равна произведению силы на пройденный путь и на косинус угла между направлением силы и путём.***

Легко установить, что формула $A = Fs \cos \alpha$ охватывает все три частных случая работы, рассмотренных нами выше. Действительно, при $\alpha = 0$ направление силы совпадает с направлением движения, в этом случае $A = Fs$; при $\alpha = 90°$ сила перпендикулярна направлению движения и $A = 0$ и, наконец, при $\alpha = 180°$ сила направлена против движения, и работа $A = -Fs$.

**62. Единицы работы**. *За единицу работы принимается работа единицы силы на пути, совпадающем с направлением силы и равном единице.*

1 ед. работы = 1 ед. силы · 1 ед. пути.

В системе *CGS* единицей работы является эрг (обозначается *э*). *Эрг есть работа силы в 1 дину на пути в 1 см.*

$$1\ э = 1\ дн \cdot 1\ см = 1\ г\ \frac{см^2}{сек^2}.$$

В системе *MKSA* единицей работы является джоуль (*дж*). *Джоуль есть работа силы в 1 ньютон на пути в 1 м.*

1 джоуль = 1 ньютон · 1 метр = 1 ньютонметр = 1 *нм.*

В технической системе единиц единицей работы является килограммометр (*кГм*). *Килограммометр есть работа силы в 1 кГ на пути в 1 м.*

1 килограммометр = 1 *кГ* · 1 *м* = 1 ***кГм.***

Найдём соотношение между единицами работы эргом и джоулем. Так как 1 ньютон = $10^5$ *дн*, 1 *м* = 100 *см*, то

$1\ дж = 1\ нм = 10^5\ дн \cdot 10^2\ см = 10^7\ дн\ см = 10^7\ э.$

Итак, $1\ дж = 10^7\ э.$ (1)

Соотношение между килограммометром и эргом найдётся из следующих равенств: $1\ кГ = 980\,000\ дн$ и $1\ м = 100\ см$; отсюда $1\ кГм = 980\,000\ дн \cdot 100\ см = 98\,000\,000\ дн\ см = 9{,}8 \cdot 10^7\ э.$

Итак,

$$1\ кГм = 9{,}8 \cdot 10^7\ э. \qquad (2)$$

Работа, равная $10^7$ эргам, называется джоулем. Таким образом, $1\ кГм = 9{,}8\ дж.$

***Упражнение 38.***

1. Масса ведра с водой равна 15 *кг*. Ведро с водой поднимается равномерно из колодца глубиной 10 *м*. Вычислить совершённую при этом работу в эргах, джоулях и килограммометрах.

2. Вычислить в *кГм* работу лошади, везущей равномерно по горизонтальному пути воз весом 2*T* на расстояние 0,5 *км*. Коэффициент трения равен 0,02.



3. Лифт весом 1,5*T* начинает подниматься с ускорением в $1 \frac{м}{сек^2}$. Вычислить работу двигателя лифта в *кГм* в течение первых 2 сек. подъёма. Принять $g = 10\ \frac{м}{сек^2}$.

4. Напишите наименование (размерность) единицы работы в системе *CGS*.

**63. Мощность.** Одну и ту же работу различные машины могут совершить в разное время.

Так, например, гусеничный трактор ДТ-54 вспашет в течение рабочего дня почти в два раза больший участок земли, чем четырёхколёсный трактор СТЗ. А шагающий экскаватор

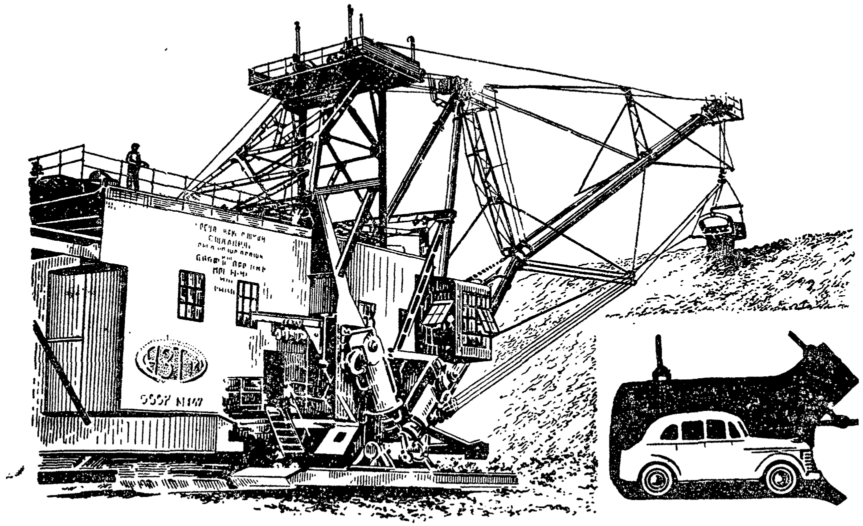


Рис. 124. Шагающий экскаватор. Справа автомобиль „Москвич" в ковше экскаватора.

(рис. 124), ковш которого вмещает 14 кубических метров (до 25 *т*) породы, за день работы выбросит из котлована примерно в 10 000 раз больше земли, чем один рабочий-землекоп.

Для сравнения работоспособности машин служит особая величина, называемая мощностью. Чем больше работы может совершить машина за данный промежуток времени, тем больше её мощность, и наоборот — чем меньше она может совершить работы за этот промежуток времени, тем меньше её мощность.

Таким образом, *мощность характеризует способность различных двигателей, машин, механизмов, животных и человека совершать большее или меньшее количество работы за данный промежуток времени.*

Проще всего характеризовать мощность машины величиной совершённой ею работы в единицу времени, например в 1 сек.

Пусть за время $t$ сек. совершена работа, равная $A$ *кГм*, тогда работа, совершённая в 1 сек., равна $\frac{A \text{ кГм}}{t \text{ сек}}$; этой величиной и характеризуется мощность машины.

***Мощностью называется величина, измеряемая отношением работы ко времени, в течение которого совершается эта работа.***

Обозначив мощность буквой $N$, мы можем написать:

$$N = \frac{A}{t}.$$

Если мощность, развиваемая машиной, равна $N$, то работа, совершённая за какой-нибудь промежуток времени $t$, определится по формуле:

$$A = N \cdot t.$$

По формуле $N = \frac{A}{t}$ определяется средняя мощность двигателя. В отдельные моменты времени мощность двигателя может быть как больше, так и меньше средней мощности. Так, например, при преодолении каких-либо препятствий (движение в гору, по грязи и т. д.) двигатель автомобиля развивает мощность в $1\frac{1}{2}$—2 раза бóльшую, чем при езде по ровной дороге. Однако длительное время на такой мощности двигатель работать не может: он, как известно, перегревается.

В отдельные небольшие промежутки времени, например при прыжках, и человек может развить мощность в несколько раз бóльшую его средней мощности, которую он развивает в течение продолжительного времени.

Так как $A = Fs$, то формулу для определения мощности можно написать в виде:

$$N = \frac{Fs}{t}.$$

Полагая $\frac{s}{t} = v$, получим

$$N = Fv,$$

т. е. *величина мощности равна произведению силы на скорость.*

Если один раз мы будем подниматься по лестнице шагом, а другой раз по той же лестнице на ту же высоту бегом, то работа, совершаемая нами в обоих случаях, будет одна и та же. Но во втором случае мы поднимаемся с большей скоростью, в течение меньшего промежутка времени, чем в первом случае. Поэтому и развиваемая мощность во втором случае больше, чем в первом.

Формула $N = Fv$ показывает, что при одной и той же мощности двигателя изменением скорости можно изменять силу тяги автомобиля, паровоза, подъёмного крана и т. п.



**64. Единицы мощности.** *За единицу мощности принимают такую мощность, при которой в единицу времени совершается работа, равная единице работы.*

Поэтому в системе *CGS* единицей мощности будет 1 эрг в секунду, или $1\ \frac{э}{сек}$.

В системе единиц *MKSA* единицей мощности будет $1\ \frac{дж}{сек}$; эта единица носит специальное название — ватт (*вт*). Таким образом,

$$1\ вт = 1\ \frac{дж}{сек}.$$

В технической системе единиц единицей мощности будет $1\ \frac{кГм}{сек}$.

Часто применяются следующие единицы мощности: гектоватт (*гвт*), киловатт (*квт*) и лошадиная сила (*л. с.*).

$$1\ гвт = 100\ вт;$$
$$1\ квт = 1000\ вт;$$
$$1\ л.\ с. = 75\ \frac{кГм}{сек};$$
$$1\ \frac{кГм}{сек} = 9{,}8\ \frac{дж}{сек} = 9{,}8\ вт.$$

**Таблица мощностей**

| | |
|---|---|
| Человек | 0,05—0,1 *л. с.* |
| Лошадь | 0,8—0,9 *л. с.* |
| Двигатель автомобиля (легкового) | |
| „Москвич“ | 23 *л. с.* |
| „Победа“ | 50 *л. с.* |
| ЗИС-110 | 140 *л. с.* |
| Двигатель автомобиля (грузового) | |
| ГАЗ-51 | 70 *л. с.* |
| ЗИС-150 | 90 *л. с.* |
| ЯАЗ-200 | 110 *л. с.* |
| Двигатель трактора ДТ-54 | 54 *л. с.* |
| „ мощного самолёта | 1 000—2 000 *л. с.* |
| Сталинградская гидроэлектростанция (проект) | 1 700 000 *квт* |
| Куйбышевская гидроэлектростанция (проект) | 2 100 000 *квт* |

***Упражнение 39.***

1. Рассчитать, скольким $\frac{э}{сек}$ и скольким ваттам равна 1 *л. с.*

2. Рассчитать с точностью до 0,01, скольким лошадиным силам равен 1 *квт*.

3. Человек весом 75 $кГ$, взбегая по лестнице, поднимается на высоту 12 $м$ в течение 0,25 мин. Определить развиваемую при этом мощность в $\frac{кГм}{сек}$ и ваттах.

4. Паровоз, развивая мощность 800 $л.$ $с.$, проходит в течение 20 сек. 0,3 $км$, двигаясь равномерно. Определить силу тяги паровоза.

5. Вес черпака с углем равен 0,3 $Т$. Определить мощность двигателя подъёмного крана, если в 5 сек. черпак поднимается на высоту 15 $м$.

6. Определить работу, совершаемую двигателем мощностью 100 $квт$ в течение 1 часа.

7. Мощный башенный кран, освоенный Куйбышевским заводом строительных механизмов, может поднять груз весом 5 $Т$. Если для подъёма груза двигатель крана развивает мощность 30 $квт$, то в течение какого времени груз будет поднят на высоту 20 $м$?

**65. Закон равенства работ.** Человечество с незапамятных времён пользуется различными машинами, облегчающими, ускоряющими и заменяющими труд человека.

*Машинами называются всякие приспособления, служащие для преобразования энергии и производства работы.*

Любая сложная машина, как показывают исследования, может быть разложена на ряд простых механизмов, к числу которых относятся рычаг, наклонная плоскость, клин, винт и др.

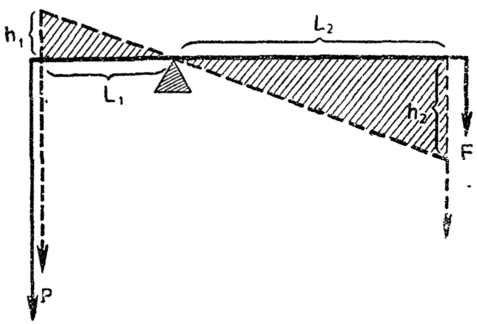



Рис. 125. Рычаг.

Для приведения механизма в действие к нему должна быть приложена движущая сила (мускульная сила человека и животных, сила давления ветра, воды, пара, газа и т. п.), которая, действуя на некотором пути, преодолевает силу сопротивления и совершает при этом работу.

Одну и ту же работу можно произвести различно. Можно, например, увеличить пройденный путь, уменьшив во столько же раз силу; можно, наоборот, увеличив силу, уменьшить путь.

На рисунке 125 показано, что под действием силы $F$, приложенной к длинному плечу рычага, поднимается груз $P$, приложенный к короткому плечу рычага, $h_2$ и $h_1$—пройденные пути точками приложения сил $F$ и $P$.

Измерения показывают, что силы обратно пропорциональны путям:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{P}{F}.$$



Таким образом, *при перемещении рычага выигрывается в силе столько, сколько проигрывается в пути.* Работы же, совершённые движущей силой и силой сопротивления, одинаковы: $Fh_2 = Ph_1$.

Выводы, полученные нами при рассмотрении работы с помощью рычага, справедливы для всякой машины и механизма. Они выражают собой один из важнейших законов механики, согласно которому ***во сколько раз мы выигрываем в силе, во столько же раз проигрываем в пути.*** Одновременный выигрыш в пути и в силе невозможен.

Этот закон называют золотым правилом механики. Им широко пользовались в своих работах Леонардо да Винчи, Галилей, Ньютон. Галилей считал, что это правило было открыто древнегреческим учёным Аристотелем. Но несомненно, что человечество применяло его на практике ещё задолго до Аристотеля.

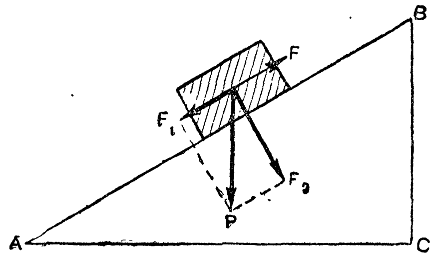



Рис. 126. Наклонная плоскость.

Обозначим преодолеваемую машиной силу сопротивления через $F_2$, перемещение её точки приложения через $s_2$, приложенную движущую силу через $F_1$ и перемещение её точки приложения через $s_1$. Тогда золотое правило механики может быть записано следующим образом:

$$F_1 s_1 = F_2 s_2.$$

Если не принимать во внимание потерь на трение и на преодоление других вредных сопротивлений, то *работа движущей силы равна работе силы сопротивления.* Золотое правило механики, выраженное в такой форме, представляет собой закон равенства работ.

***Ни одна машина или механизм не может дать выигрыша в работе.***

Этот закон природы оказался весьма плодотворным для развития науки и техники. Он послужил основой для установления более общего закона природы — закона сохранения и превращения энергии (§ 77).

Рассмотрим примеры практического применения закона равенства работ.

**66. Закон равенства работ в применении к наклонной плоскости.** На рисунке 126 изображена схема наклонной плоскости $ABC$. Пользуясь законом равенства работ, выведем соотношение между силой $F$, которую надо приложить к телу, чтобы поднять его по наклонной плоскости, и весом $P$ этого тела.

Если тело поднимается по наклонной плоскости равномерно, то в отсутствие трения сила $F$, движущая тело вверх, равна силе $F_1$, скатывающей тело.

Работа, совершаемая при перемещении тела по наклонной плоскости длиной $l = AB$, равна $Fl$. Работа же по перемещению груза $P$ по вертикали $h = BC$ равна $Ph$. По закону равенства работ $Fl = Ph$, откуда

$$F = P\frac{h}{l}.$$

Такое же соотношение между силами $F$ и $P$ даёт разложение сил, рассмотренное в § 42 а.

***Упражнение 40.***

Применяя законы равноускоренного движения и зная ускорение при движении по наклонной плоскости, докажите, что скорость тела в конце наклонной плоскости равна скорости тела, свободно падающего с высоты наклонной плоскости.

**67. Закон равенства работ в применении к винту. Домкрат.** Для подъёма больших тяжестей часто применяется особый механизм, называемый домкратом. Домкрат представляет собой сочетание подвижного винта с рычагом (рис. 127).

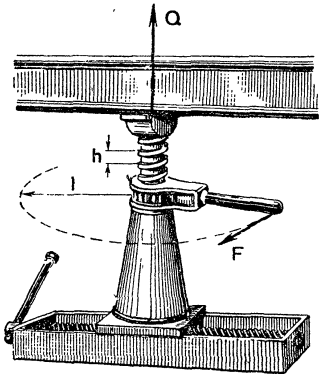



Рис. 127. Винтовой домкрат.

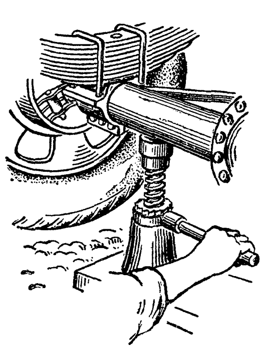


Рис. 128. Применение домкрата.

Исключая из рассмотрения трение, применим к домкрату закон равенства работ.

Движущая сила $F$ приложена к рукоятке домкрата на расстоянии $l$ от оси винта. Поднимаемый груз (автомобиль, вагон и т. д.) действует на головку домкрата сверху вниз с силой $Q$. С такой же по величине силой $Q$ головка домкрата действует на груз снизу вверх.

При одном обороте рукоятки домкрата точка приложения силы пройдёт путь, равный длине окружности $2\pi l$. Совершённая при этом работа $A_1 = F \cdot 2\pi l$.



В то же время точка приложения силы $Q$, поднимающей груз, переместится на величину шага винта $h$. Совершённая при этом работа $A_2 = Q \cdot h$.

На основании закона равенства работ:

$$A_1 = A_2,$$

или

$$F \cdot 2\pi l = Q\cdot h,$$

откуда

$$\frac{Q}{F} = \frac{2\pi l}{h}.$$

Из этого равенства следует, что *вес поднимаемого груза во столько раз больше приложенной к рукоятке домкрата силы, во сколько раз длина окружности, по которой движется конец рукоятки, больше шага винта.*

Домкрат имеется при каждом автомобиле, с помощью его шофёр поднимает машину при смене покрышек на колёсах и в различных других случаях (рис. 128).

Домкрат широко применяется также для подъёма вагонов в железнодорожном транспорте, а также в строительном деле.

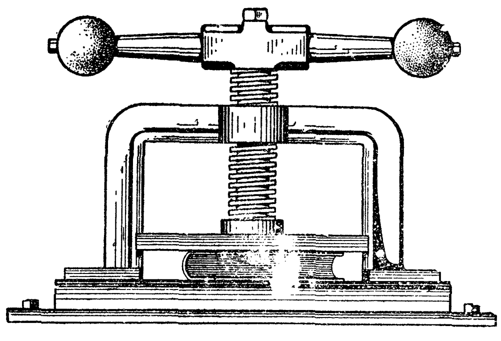


Рис. 129. Винтовой пресс.

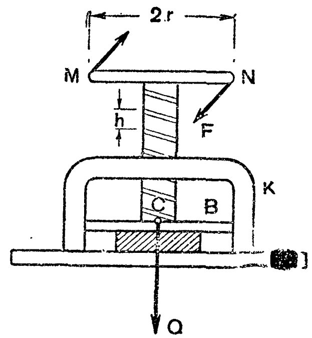



Рис. 130. К выводу соотношения между силами $Q$ и $F$.

**68. Винтовой пресс.** На рисунке 129 изображён ручной винтовой пресс, который обычно применяется в переплётном деле. Пользуясь законом равенства работ, рассчитаем, во сколько раз сила давления на предмет в винтовом прессе больше силы, приложенной к прессу. Обратимся к схеме пресса (рис. 130).

Ввинчиваясь в неподвижную раму $K$, винт давит на подложенный под пресс $B$ предмет с силой $Q$. Пусть длина рукоятки винта $2r$, а шаг винта $h$. К рукоятке винта в точках $M$ и $N$ приложены две равные силы $F$, векторы которых перпендикулярны рукоятке.

Обозначим через $s$ перемещение точек приложения сил $F$ и $F$ (точек $M$ и $N$), а через $z$ — перемещение точки приложения силы $Q$ (точки $C$).

Совершённая при этом перемещении обеими силами работа $A_1 = 2F \cdot s$, а работа силы $Q$: $A_2 = Q \cdot z$.

Согласно закону равенства работ (исключая трение): $A_1 = A_2$ или $2F \cdot s = Q \cdot z$, откуда $Q = 2F \cdot \frac{s}{z}$. (1)

Но мы знаем, что если конец рукоятки винта опишет путь, равный длине окружности $2\pi r$, винт продвинется на расстояние, равное шагу винта $h$. На основании этого можно написать следующее равенство:

$$\frac{s}{z} = \frac{2\pi r}{h}. \quad (2)$$

Подставив в формулу (1) значение $\frac{s}{z}$ из равенства (2), мы получим формулу, выражающую соотношение между силой $F$, приложенной к рукоятке пресса, и силой давления $Q$ пресса на предмет:

$$Q = \frac{4\pi r}{h} \cdot F.$$

**69. Гидравлический пресс.** Передача жидкостью производимого на неё давления и практическая несжимаемость её используются в устройстве различных гидравлических машин.

На рисунке 131 изображены два сообщающихся цилиндра с поршнями $A$ и $B$. Цилиндры под поршнями заполнены жидкостью. Допустим, что на поршни действуют силы $F_1$ и $F_2$. Рассмотрим, каково отношение величин этих сил при равновесии, если площади поршней равны соответственно $S_1$ и $S_2$. Воспользуемся для этого законом равенства работ.

Пусть поршень $A$ под действием силы $F_1$ опустился на расстояние $l_1$. Совершённая при этом работа равна $F_1 l_1$. При опускании поршня из левого цилиндра вытесняется объём воды $S_1 l_1$, который перейдёт в правый цилиндр, причём поршень $B$ в этом цилиндре поднимается на высоту $l_2$, определяемую из равенства:

$$S_1 l_1 = S_2 l_2. \quad (1)$$

При поднятии поршня $B$ на высоту $l_2$ совершается работа, равная $F_2 l_2$.

На основании закона равенства работ можно написать:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2. \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) следует, что

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \text{ или } \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2},$$

т. е. *силы, действующие на поршни, прямо пропорциональны площадям поршней.*



Таким образом, действуя малой силой на поршень с малой площадью, можно преодолеть большое сопротивление, действующее на поршень с большой площадью. На этом принципе основано устройство **гидравлического пресса.**

Гидравлический пресс, схема устройства которого показана на рисунке 132, состоит из двух сообщающихся между собой прочных металлических цилиндров с поршнями. Цилиндры сообщаются металлической трубкой и наполнены маслом. Прессуемый предмет кладётся на платформу, соединённую с большим поршнем, и сдавливается между ним и неподвижной верхней платформой $W$. При подымании ручки малого поршня вверх клапан $A$, соединяющий малый цилиндр с дополнительным резервуаром $C$, приподнимается и масло поступает в малый цилиндр. При опускании ручки поршня и, следовательно, самого поршня масло сдавливается, клапан $A$ закрывается. В то же время клапан $B$, соединяющий малый цилиндр с большим, открывается, и масло поступает в большой цилиндр, производя давление на большой поршень.

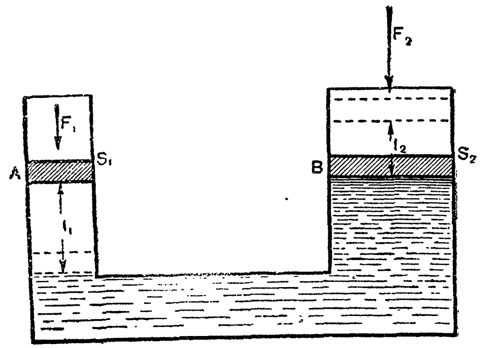


Рис. 131. Сообщающиеся цилиндры с поршнями.

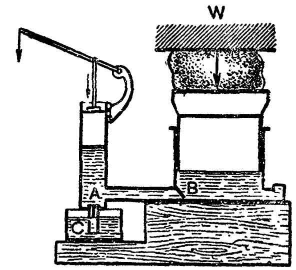


Рис. 132. Схема устройства гидравлического пресса.

Область применения гидравлического пресса очень велика. Его используют при прессовании различных материалов, например бумаги, сена, хлопка. Гидравлическим прессом сгибают толстые металлические плиты, штампуют металлические предметы, продавливают отверстия в толстых листах, испытывают прочность различных материалов и т. д.

Передатчиком силы у пресса может служить, вообще говоря, любая жидкость. В технике, однако, чаще всего применяются масляные прессы. При помощи мощных гидравлических прессов удаётся развивать силы свыше 10 000 $T$.

**70. Коэффициент полезного действия машин и механизмов.** При совершении работы приходится преодолевать не только полезные сопротивления, но и вредные, например сопротивления в виде трения в движущихся частях машин.

Поэтому полная работа, совершаемая движущей силой, всегда больше работы по преодолению полезных сопротивлений, которую называют полезной работой.

***Отношение полезной работы к полной работе называется коэффициентом полезного действия.***

Если, например, для подъёма тела по наклонной плоскости без трения требуется сила $F$, то при наличии трения придётся приложить к телу силу $F+f$, и только тогда мы сможем тело двигать равномерно вверх по наклону.

Полезная работа, совершённая при этом, равна $Ph=Fl$. Полная же работа равна $(F+f)\,l$.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) наклонной плоскости найдётся из равенства:

$$\text{к. п. д.} = \frac{Fl}{(F+f)\,l} = \frac{F}{F+f}.$$

Подобным образом рассчитывается к. п. д. любой машины и механизма.

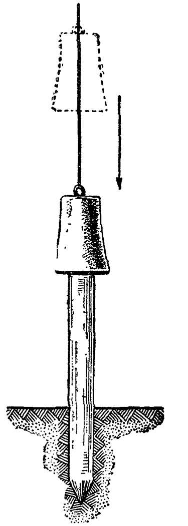


Рис. 133. Забивание сваи.

**71. Энергия.** До сих пор мы говорили о работе. С работой тесно связана другая, также чрезвычайно важная физическая величина — энергия.

Если тело или несколько тел, взаимодействующих между собой (система тел), способны совершить работу, то они обладают энергией.

Энергией, например, обладает груз, поднятый на некоторую высоту относительно земли, так как при падении с этой высоты может быть совершена работа. Падение тяжёлого тела (копровой бабы) используется, например, для забивания свай (рис. 133). При вбивании сваи преодолевается сила сопротивления грунта, значит, совершается работа.

***Энергия есть величина, характеризующая способность тела или системы тел совершать работу.***

Пусть, например, груз весом 10 *кГ* находится на высоте 5 *м*. При падении с этой высоты совершится работа $A=10\,кГ\cdot 5\,м = 50\,кГм$.

Эта же величина определит запас энергии тела на высоте 5 *м*, если условиться считать энергию груза на поверхности земли равной нулю. Итак, *величина возможной работы определяет запас энергии в теле или в системе тел.* Отсюда видно, что энергия измеряется теми же единицами, что и работа.

**72. Потенциальная энергия.** ***Энергия, которая определяется взаимным положением тел*** (например, тела и земли) ***или частей одного и того же тела, называется потенциальной энергией***[1].

[1] Слово потенциальный происходит от слова потенция, что означает способность.



Примером потенциальной энергии является энергия тела, поднятого относительно земли. Если условно принять потенциальную энергию тела, лежащего на земле, равной нулю, тогда потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту, будет измеряться работой, которую произведёт сила тяжести при падении этого тела на землю.

Если тело весом $P$ поднято на высоту $h$, то величина совершаемой при падении работы $A$ равна произведению веса тела на высоту, т. е. $A=Ph$. Обозначим потенциальную энергию тела через $W_п$; поскольку $W_п=A$, то мы можем написать:

$$W_п = A = mgh.$$

Например, тело массой $m=10$ *г* на высоте $h=100$ *см* будет обладать потенциальной энергией:

$$W_п = 10г\cdot 980\ \frac{см}{сек^2}\cdot 100\ см =$$

$$= 980\,000\ \frac{гсм^2}{сек^2},\ \text{или}\ 980\,000\ э.$$

На высоте 10 *м* тело весом 5 *кГ* будет обладать потенциальной энергией $W_п = 5\ кГ\cdot 10\ м = 50\ кГм$.

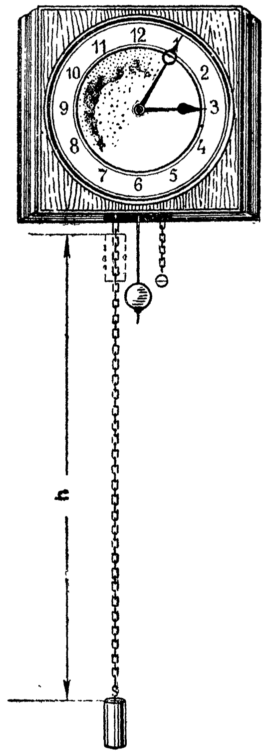


Рис. 134. Потенциальная энергия поднятой гири используется для работы часов.

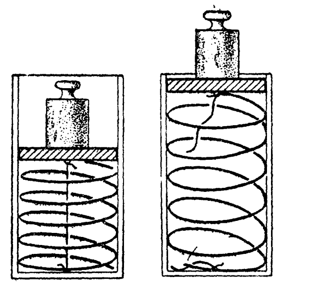


Рис. 135. При сжатии пружины увеличивается её потенциальная энергия.

Потенциальная энергия поднятого тела используется, например, в часах с гирями (рис. 134). Поднимая гирю весом $P$ на высоту $h$, мы совершаем работу $A=Ph$, на величину которой увеличивается потенциальная энергия гири $W_п=A=Ph$. Эта энергия затем расходуется на приведение в движение механизма часов; гиря при этом опускается, т. е. потенциальная энергия её уменьшается.

Потенциальной энергией обладает вода, которая приподнята плотиной гидростанции. Опускаясь вниз, вода приводит в движение турбины электростанции.

Потенциальной энергией обладают не только тела, поднятые относительно земли. При растяжении или сжатии пружины производится работа (рис. 135). При этом отдельные части пружины меняют положение друг относительно друга. Растянутая или сжатая пружина приобретает потенциальную энергию, за счёт которой, если пружину отпустить, может совершиться работа.

Рис. 136. Горная речка. Благодаря большой скорости течения вода в горных речках обладает большой кинетической энергией, которая может быть использована гидроэлектростанциями.

Потенциальная энергия сжатых пружин используется, например, в ружьях для приведения в движение ударника с бойком.

Когда курок винтовки ставится на боевой взвод, то пружина затвора сжимается, запасая потенциальную энергию. Когда же нажимают спусковой крючок, пружина, освобождаясь, толкает ударник с бойком, который, ударяя по капсулю, взрывает пороховой заряд патрона.

Энергия закрученных пружин используется в часах, в патефонах и разнообразных заводных игрушках.

В автомобилях, вагонах и экипажах пружины рессор, деформируясь, уменьшают толчки.

Потенциальной энергией обладает любое упругое деформированное тело. Потенциальная энергия сжатого газа используется в работе отбойных молотков, которые широко применяются в горной промышленности, при строительстве дорог, выемке твёрдого грунта и т. д.

Потенциальная энергия упруго деформированного тела измеряется той работой, которая производится при деформации тела.

**73. Кинетическая энергия.** Мы познакомились с потенциальной энергией, которая определяется положением тел. Но тела



могут обладать энергией не только потому, что они занимают определённое положение, но и потому, что они находятся в движении. Летящий горизонтально на некоторой высоте снаряд, встретив на своём пути какое-нибудь препятствие (например, самолёт), пробивает его, преодолевая сопротивление, т. е. совершает работу. Потенциальная энергия снаряда может при этом и не меняться. Работа совершается снарядом исключительно за счёт энергии, обусловленной его скоростью, которая при этом уменьшается.

Благодаря наличию скорости тело может двигаться вверх, преодолевая силу тяжести, т. е. совершая работу.

Таким образом, всякое движущееся тело обладает энергией.

***Энергия, которой обладает тело вследствие своего движения, называется энергией движения или кинетической энергией.***

Если принять кинетическую энергию покоящегося тела равной нулю, то кинетическая энергия тела будет равна той работе, которая производится при уменьшении скорости тела до нуля.

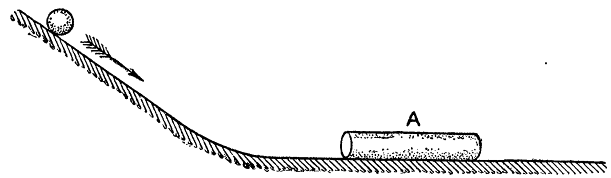



Рис. 137. Опыт, показывающий зависимость кинетической энергии тела от его массы и скорости.

Чтобы установить, от чего зависит величина кинетической энергии, обратимся к опыту.

На рисунке 137 изображён наклонный жёлоб, к которому примыкает горизонтальный жёлоб. На горизонтальном жёлобе лежит небольшой гладкий деревянный цилиндр A.

Если пустить по наклонному жёлобу металлический шарик, то он, скатившись с наклона, ударяется о деревянный цилиндр и передвигает его на некоторое расстояние, т. е. совершает работу.

Будем скатывать шарик с разных высот. Мы заметим, что чем с большей высоты скатывается шарик, а значит, чем больше скорость, с которой он ударяется о цилиндр, тем дальше передвигается цилиндр.

В этом опыте деревянный цилиндр после удара скользит по горизонтальному жёлобу с небольшой скоростью, поэтому силу трения можно считать постоянной. Чем дальше продвинется цилиндр, тем больше совершённая шариком работа, тем, следовательно, большей кинетической энергией обладал шарик до удара о цилиндр. Таким образом, кинетическая энергия зависит от скорости тела.

Если произвести опыт с шариками разных масс, то можно убедиться, что кинетическая энергия шарика тем больше, чем больше его масса.

Из сказанного ясно, что кинетическая энергия тела зависит от его массы и скорости. Выведем эту зависимость для случая прямолинейного движения тела под действием постоянной силы.

Чтобы привести тело в движение, необходимо на него подействовать некоторой силой $F$, т. е. необходимо совершить работу на некотором пути $s$. Если не принимать в расчёт трение и сопротивление воздуха, то результатом работы силы $F$ будет изменение скорости тела. Под действием постоянной силы тело движется равноускоренно.

Так как $F = ma$ и $s = \frac{v^2}{2a}$, то работа силы $F$ равна:

$$A = Fs, \text{ или } A = \frac{mav^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}.$$

Выражение $\frac{mv^2}{2}$ определяет величину кинетической энергии ($W_k$) тела:

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

**Пример 1.** Вычислим кинетическую энергию пули, если скорость её при вылете из ружья $v = 600$ *м/сек*, масса пули 7,5 *г*.

Выразим кинетическую энергию пули в единицах системы *CGS*, т. е. в эргах. Для этого в формуле $\frac{mv^2}{2}$ масса и скорость пули нужно выразить также в единицах системы *CGS*.

$$v = 600 \frac{100 \text{ см}}{\text{сек}} = 60\,000 \frac{\text{см}}{\text{сек}};$$

$$W_k = \frac{7{,}5 \text{ г} \cdot \left(60\,000 \frac{\text{см}}{\text{сек}}\right)^2}{2} = 1{,}35 \cdot 10^{10} \frac{\text{гсм}^2}{\text{сек}^2} = 1{,}35 \cdot 10^{10} \text{ э}.$$

**Пример 2.** Самолёт весом 2000 *кГ* движется со скоростью 360 $\frac{\text{км}}{\text{час}}$. Выразить кинетическую энергию самолёта в единицах системы *MKSA*, т. е. в джоулях.

Напишем сначала, чему равна масса и скорость в единицах этой системы:

$$m = 2000 \text{ кг}, \; v = 360 \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ сек}} = 100 \frac{\text{м}}{\text{сек}};$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}; \; W_k = \frac{2000 \text{ кг} \cdot \left(100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}\right)^2}{2} = 10^7 \frac{\text{кгм}^2}{\text{сек}^2} = 10^7 \text{ дж}.$$



**Пример 3.** Определить в единицах технической системы, т. е. в килограммометрах, кинетическую энергию вагона весом 39,2 *Т*, движущегося со скоростью 36 $\frac{\text{км}}{\text{час}}$.

Выразим сначала массу и скорость вагона в единицах технической системы:

$$m = \frac{39\,200 \text{ кГ}}{9{,}8 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}} = 4000 \frac{\text{кГ} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}}; \quad v = 36 \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ сек}} = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}};$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}; \; W_k = \frac{4000 \frac{\text{кГ} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}} \cdot 100 \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2}}{2} = 200\,000 \text{ кГм}.$$

**74. Полная энергия падающего тела.** Рассмотрим, как изменяются потенциальная и кинетическая энергия свободно падающего тела.

Пусть тело, масса которого $m$, находится на высоте $h$ (рис. 138). Пока тело не движется, кинетическая энергия его $W_k = 0$. Потенциальная же энергия тела $W_n = mgh$.

Полная энергия тела равна сумме обоих видов энергии, т. е.

$$W_n + W_k = mgh.$$

Определим изменение кинетической и потенциальной энергии тела с массой $m$ через $t$ сек. от начала падения.

При падении тела высота уменьшается, значит, и потенциальная энергия его уменьшается. За $t$ сек. падения высота уменьшится на величину $\frac{gt^2}{2}$. Убыль потенциальной энергии за это время выразится величиной:

$$W_n' = mg \frac{gt^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}. \qquad (1)$$

Потенциальная энергия тела станет равной разности значений её в начале и в конце промежутка времени $t$.

$$W_n = mgh - \frac{mg^2t^2}{2}. \qquad (2)$$

С другой стороны, за $t$ сек. скорость тела возрастёт на величину $v = gt$; возрастёт, следовательно, и кинетическая энергия. Приращение кинетической энергии выразится величиной:

$$W_k' = \frac{mv^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}. \qquad (3)$$

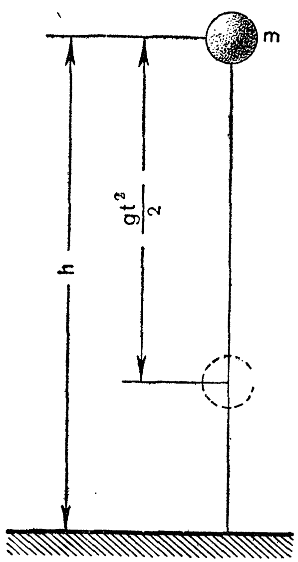


Рис. 138. К закону сохранения энергии при свободном падении тела.

Сравнивая выражение (3) с выражением (1) для убыли потенциальной энергии, мы видим, что *убыль потенциальной* *энергии свободно падающего тела за какой-нибудь промежуток времени равна приросту кинетической энергии за тот же промежуток времени.*

Таким образом, при падении тела потенциальная энергия превращается в кинетическую.

При движении же тела вертикально вверх, как это теперь нетрудно видеть, кинетическая энергия превращается в потенциальную.

Сложив выражение (2) с (3), получим величину полной энергии тела:

$$W = W_n + W_k; \quad W = mgh - \frac{mg^2t^2}{2} + \frac{mg^2t^2}{2} = mgh.$$

В момент падения тела на землю потенциальная энергия полностью превращается в кинетическую:

$$W_n = 0, \ W_k = \frac{mv^2}{2}; \text{ так как } v^2 = 2gh, \text{ то } W_k = mgh.$$

Полная энергия тела $W = W_n + W_k = 0 + mgh = mgh$. Таким образом, *сумма кинетической и потенциальной энергии тела при свободном падении с высоты $h$* в течении всего времени падения равна $mgh$, т. е. *остаётся величиной постоянной.*

Этот вывод представляет собой частный случай одного из важнейших законов природы — закона сохранения и превращения энергии.

**75. Работа по преодолению сил трения и сопротивления среды.** Энергию движения тел (кинетическую энергию) и энергию, определяемую взаимным положением тел (потенциальную энергию), принято называть механической энергией, так как эти виды энергии рассматриваются в механике.

На примере свободного падения тела мы видели, что потенциальная и кинетическая энергия может превращаться одна в другую. Суммарное же количество механической энергии остаётся без изменения.

Однако этот вывод справедлив лишь в случае отсутствия сопротивления движению.

Рассмотрим, например, движение парашютиста (рис. 139). До раскрытия парашюта парашютист движется вниз ускоренно. Потенциальная энергия его убывает. За счёт убыли этой энергии возрастает кинетическая энергия и совершается работа против сил сопротивления воздуха. Возросшее при раскрытом парашюте сопротивление воздуха уменьшает скорость падения, следовательно, теперь уменьшается как потенциальная, так и кинетическая энергия.

Уменьшение скорости падения парашютиста происходит до определённой величины. Достигнув некоторой скорости, парашютист продолжает движение вниз с этой постоянной скоростью. Кинетическая энергия его при этом постоянна, потенциальная же энергия всё время уменьшается (уменьшается высота над землёй).



Если $mgh$ — потенциальная энергия парашютиста, находящегося в самом верхнем положении, а $\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия в момент приземления его, то работа по преодоле-

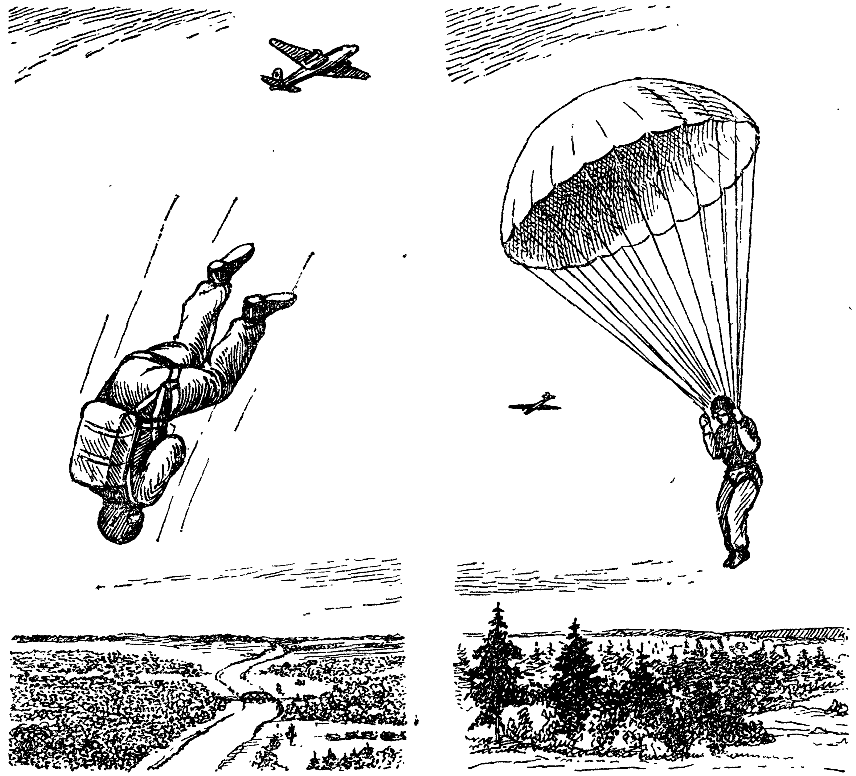


Рис. 139. Спуск парашютиста.

нию сил сопротивления воздуха при падении парашютиста равна убыли механической энергии и выразится формулой:

$$A = mgh - \frac{mv^2}{2}.$$

Таким образом, *при наличии сопротивления среды механическая энергия движущегося тела убывает.* За счёт убыли этой энергии производится работа против сил сопротивления среды.

Так же обстоит дело, если при движении действуют силы трения между твёрдыми телами. Например, при подходе поезда к станции, когда машина паровоза не работает, работа против сил трения производится за счёт убыли кинетической энергии поезда, скорость которого при этом уменьшается. При скольжении тела с наклонной плоскости с постоянной скоростью работа против силы трения производится за счёт убыли потенциальной энергии тела.

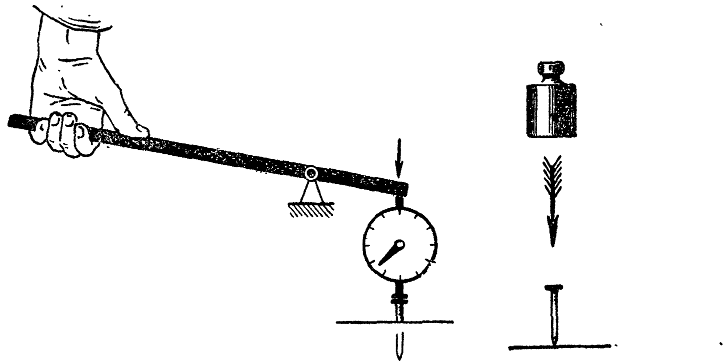


Рис. 140. Вдавливание гвоздя в доску рычагом и забивание его падающей гирей.

**76. Удар тел.** При встрече движущегося тела с каким-нибудь другим телом между ними происходит кратковременное взаимодействие, называемое у д а р о м.

При ударе, который длится сотые и тысячные доли секунды, могут быть развиты очень большие силы, что широко используется в технике. Замахиваясь, например, молотом, рабочий

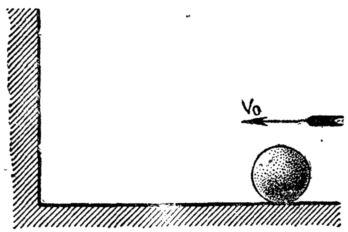



Рис. 141а. Упругий шар движется к неподвижной стенке.

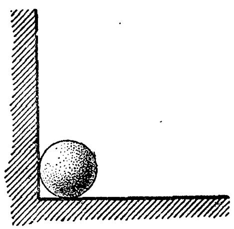


Рис. 141б. Момент удара шара о стенку.

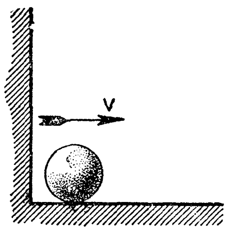



Рис. 141в. Шар движется от стенки после удара.

совершает работу сравнительно небольшой силой на длинном пути. За счёт полученной при этом кинетической энергии при ударе молотом производится работа на более коротком пути, но значительно большей силой.

На рисунке 140 изображено вдавливание гвоздя в доску с помощью рычага и забивание ударом падающей гири. Если измерить динамометром силу, с которой конец рычага действует на гвоздь, то динамометр покажет, что приложенное усилие значительно больше веса падающей гири.



На частном примере удара шара о неподвижную стенку рассмотрим, какие превращения энергии происходят при ударе тел.

На рисунке 141а изображён шар, движущийся к неподвижной стенке в направлении, перпендикулярном к ней.

Время, в течение которого происходит удар шара о стенку, можно разделить на два периода. В течение первого периода шар и стенка сплющиваются (рис. 141 б—на рисунке сплющивание не показано), в стенке возникают силы упругости, которые тормозят движение шара, и шар останавливается. Кинетическая энергия шара уменьшается до нуля, превращаясь в потенциальную энергию упруго деформированных шара и стенки.

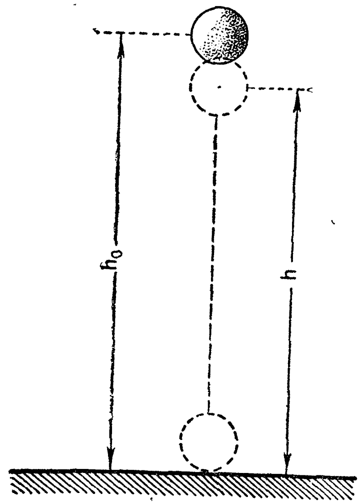



Рис. 142. Упругий шарик, упавший с некоторой высоты, не поднимается на ту же высоту.

Во втором периоде, который наступает сразу же за окончанием первого, шар и стенка под действием сил упругости восстанавливают свою прежнюю форму. При этом скорость шара, изменив направление на противоположное, возрастает по абсолютной величине; в связи с этим растёт и кинетическая энергия шара. Наконец, шар отделяется от стенки, и этим заканчивается процесс удара (рис. 141в).

Наблюдения показывают, что шар отскакивает от стенки с некоторой скоростью $v$, величина которой меньше скорости $v_0$ шара до удара.

Действительно, если уронить стальной шар с некоторой высоты $h_0$ (рис. 142), то, ударившись о стальную площадку, он поднимается на высоту $h$, меньшую $h_0$.

Значит, после удара скорость шара уменьшается. Уменьшается при этом и кинетическая энергия шара.

Деформация, возникшая у шара и стенки при ударе, полностью не восстанавливается.

На практике применяют удар для работ двоякого рода. Работы первого рода состоят в изменении формы (деформации) тел, подвергающихся удару, например при ковке, чеканке и штамповке металла, при раздроблении тела (рис. 143) и т. д. В этом случае масса неподвижного тела (например, наковальни) должна быть значительно больше ударяющего тела (молота) (см. рис. 100).

Работы второго рода состоят в перемещении тел вследствие удара, как, например, при забивке свай в землю, вбивании гвоздей, клиньев и т. д. В этом случае масса ударяющего тела должна быть значительно больше массы ударяемого; так, например, масса молотка должна быть во много раз больше массы гвоздя, масса копровой бабы значительно больше массы сваи (рис. 133) и т. д.

**77. Превращение механической энергии в другие виды энергии. Закон сохранения и превращения энергии.** Мы видели, что работа против сил трения и сопротивления среды может происходить за счёт убыли механической энергии тела. Однако эта работа бесследно не исчезает. В результате этой работы возникают другие виды энергии. При трении, например, тела нагреваются. При движении в воздухе нагревается как само движущееся тело, так и воздух, и чем больше скорость тела, тем сильнее оно нагревается. Метеориты, например, попав в атмосферу Земли, раскаляются добела. Кроме нагревания, с трущимися телами могут происходить различного рода другие изменения: они могут дробиться или переходить из одного состояния в другое; при трении, например, плавятся баббитовые вкладыши подшипников, плавятся кусочки льда; вода, которой пользуются для охлаждения свёрл, нагревается и переходит в пар. Словом, в результате работы против сил трения и сопротивления среды меняется состояние тел. Меняется скорость и взаимное расположение молекул и атомов, из которых состоит тело; следовательно, меняется (увеличивается) их энергия.

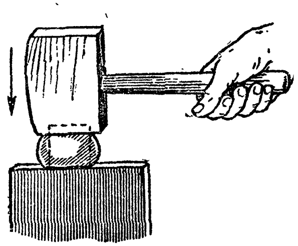


Рис. 143. Деформация тела при ударе.

Сумма кинетической и потенциальной энергии всех частичек, из которых состоит тело, называется внутренней энергией тела.

Таким образом, при трении механическая энергия превращается во внутреннюю энергию тела.

В генераторах тока механическая энергия превращается в электрическую. В электродвигателях, наоборот, электрическая энергия превращается в механическую.

Убыль одного вида энергии на самом деле представляет собой превращение его в другой какой-нибудь вид энергии.

Если подсчитать количество всех видов энергии тел, участвующих в процессе, то окажется, что это количество есть величина постоянная. ***Энергия не исчезает и не создаётся. Она лишь превращается из одного вида в другой.***

В этом состоит общий закон природы — закон сохранения и превращения энергии. Справедливость этого закона природы подтверждается всем вековым опытом и практикой человечества.

Раскрытию содержания закона сохранения и превращения энергии и его значения в современном естествознании будет уделено большое внимание в следующих частях курса физики.

В заключение вернёмся ещё раз к рассмотренному нами ранее понятию работы.

Мы видели, что при всех явлениях превращения энергии из одного вида в другой совершается работа и притом такое количество её, которое равно количеству превращённой энергии; можно утверждать поэтому, что работой измеряется превращение энергии, иначе говоря, ***работа есть мера превращения энергии.***

***Упражнение 41.***

1. а) На неподвижное тело массой 200 *г* действует сила в 400 *дн*, в результате чего через некоторое время скорость движения тела достигает 20 $\frac{см}{сек}$. Определить работу силы за это время.

б) Ту же скорость тело приобретает под действием силы в 800 *дн*. Какова работа в этом случае?

в) Сравнить ответы пунктов „а“ и „б“. Одинаковы ли работы в обоих случаях? Почему?

2. Кинетическая энергия вагона, движущегося с некоторой скоростью, равна 10 000 *кГм*. Какова будет кинетическая энергия вагона, если его скорость возрастёт в три раза?

3. Трамвайный вагон, масса которого 7500 *кг*, движется со скоростью 1 $\frac{м}{сек}$. Определить кинетическую энергию вагона.

4. Пуля, масса которой 10 *г*, вылетает из винтовки со скоростью 860 $\frac{м}{сек}$. Как велика кинетическая энергия пули? Сравнить её с кинетической энергией вагона в предыдущей задаче.

5. Тело, масса которого 5 *кг*, находится на высоте 12 *м* над поверхностью земли. Подсчитать его потенциальную энергию в эргах, джоулях и *кГм* относительно поверхности земли и относительно крыши здания, высота которого 4 *м*.

6. Шарик, масса которого 100 *г*, катится по горизонтальной плоскости со скоростью 50 $\frac{см}{сек}$. Может ли он вкатиться на верх уклона, высота которого 2,5 *см*? Трение в расчёт не принимать.

7. Пуля, масса которой 10 *г*, попадает в дерево толщиной 10 *см*, имея скорость 400 $\frac{м}{сек}$. Пробив дерево, пуля продолжает движение со скоростью 200 $\frac{м}{сек}$. Определить силу сопротивления, которую встречает пуля, пробивая дерево.

8. Баба копра, весящая 300 *кГ*, падает с высоты 8 *м* и ударяет в сваю. Найти кинетическую энергию её в момент удара о сваю (рис. 133).

9. Тело, масса которого 100 *г*, брошено вертикально вверх со скоростью 40 $\frac{м}{сек}$. Определить кинетическую энергию тела в начале движения и потенциальную энергию на наибольшей высоте. Сравнить полученные величины. Определить сумму потенциальной и кинетической энергии через 3 сек. от начала движения. Сравнить эту сумму с кинетической энергией в начале движения. Сделать вывод.

10. Если масса тела, о котором говорится в упражнении 9, равна 0,5 *кг*, то чему равна кинетическая энергия тела в начале бросания? Определить кинетическую и потенциальную энергию тела в высшей точке траектории и сумму этих энергий. Сравнить с кинетической энергией тела в начале бросания. Сделать вывод. В расчётах принять $g = 10\ \frac{м}{сек^2}$.

**78. Невозможность вечного двигателя.** С давних времён люди безуспешно пытались построить перпетуум мобиле, т. е. вечный двигатель — машину, которая, будучи приведена в движение, продолжала бы двигаться неопределённо долго, совершая работу и не расходуя при этом энергии. С открытием закона сохранения и превращения энергии стало ясно, что осуществить перпетуум мобиле невозможно. *Перпетуум мобиле противоречит закону сохранения и превращения энергии.*

*Упражнение 42.*

На рисунке 144 изображена одна из моделей перпетуум мобиле. Несколько поплавков находится в сосуде *B*, наполненном водой. По закону Архимеда на них действует выталкивающая сила, вследствие чего поплавки, не погружённые в воду (с левой стороны), перетягивают, и колесо вращается. Показать, почему такой „двигатель“ не может работать.

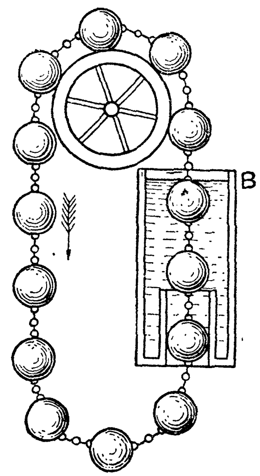



Рис. 144.
К упражнению 42.

ИЗ КНИГИ ЗАМЕЧАТЕЛЬНОГО РУССКОГО УЧЁНОГО — МЕХАНИКА В. Л. КИРПИЧЁВА (1845—1913) „БЕСЕДЫ О МЕХАНИКЕ“

...С законом живых сил и началом сохранения энергии тесно связан вопрос о perpetuum mobile, т. е. об устройстве такой машины, которая, будучи раз приведена в движение, затем будет непрерывно двигаться сама и никогда не остановится. Мало того, желают ещё, чтобы машина при своём движении постоянно производила некоторую полезную работу — молола зерно или поднимала воду и т. д., не требуя для преодоления таких сопротивлений никакой посторонней движущей силы, не вызывая ни расхода топлива, ни действия ветра или текущей воды, а черпая энергию из самой себя, из взаимного действия своих частей. Это машина, которая должна давать работу даром, без всякого расхода. История исканий perpetuum mobile в высшей степени интересна для механики, потому что она тесно переплетена с историей установления основных законов динамики. Но в ней заключается ещё особый общий интерес, так как мы имеем в ней поучительный образец человеческих исканий, стремлений и в особенности заблуждений, через которые приходится проходить человечеству по пути к истине...



...Одно из ранних упоминаний о perpetuum mobile относится к половине XIII столетия, а именно к 1269 г.

...Изобретения эти редко приводились в исполнение; чаще всего всё кончалось на бумаге...

...Но было несколько случаев исполнения проектов perpetuum mobile в больших размерах, и сохранились отзывы современников, видевших эти машины. Самый заметный случай этого рода, получивший широкую известность, представляет колесо, изобретённое Орфиреусом в 1712 г. и представленное им ландграфу Гессен-Кассельскому в 1717 г. Огромное колесо, которое Орфиреус изготовил для ландграфа (12 футов[1] диаметром, могло поднимать груз в 70 фунтов[2] на значительную высоту), было помещено в особой комнате; вход в неё был заперт и запечатан печатью ландграфа. Через два месяца открыли это помещение, и оказалось, что колесо по-прежнему вертелось.

Известие об этом факте быстро распространилось по всей Европе и вызвало сенсацию как в среде правителей того времени, так и среди учёных. Появившееся в немецких газетах печатное сообщение об изобретении Орфиреуса попалось на глаза Петру Великому, который сильно заинтересовался им; это сообщение послужило для Петра первым поводом к начатию переговоров с знаменитым немецким философом Вольфом об основании Академии наук. Пётр пригласил Вольфа приехать на каких угодно условиях в Петербург, только бы он согласился усовершенствовать изобретение Орфиреуса.

...Конец всего этого дела, вызвавшего такие неумеренные надежды, был очень печален для Орфиреуса. Обидевшись на то, что ландграф не дал ему обещанной крупной денежной награды (около 200 000 руб.) и что, не соблюдая обещанного секрета, показал его изобретение „учёному“ Гравезанду, Орфиреус разломал своё колесо „на атомы“, как выражается один писатель. Такой конец должен убедить нас в том, что Орфиреус был обманщик, испугавшийся, что при исследовании учёными его обман сейчас же будет обнаружен.

...Первые попытки устроить perpetuum mobile относятся к тому времени, когда динамика ещё не существовала и законы движения тел не были известны. Развитие этой науки, выяснение явлений движения и работы нисколько не повлияли на изобретателей вечного движения; эти фантазёры совершенно игнорировали науку и остались вовсе не затронутыми ею. Идея вечного движения владела их умами как нечто неоспоримое; ни малейшего сомнения в возможности осуществления её у них не появляется, никогда даже не подвергается разбору вопрос об исполнимости задачи — получить даровую работу из механизма. Все, иногда недюжинные, силы ума и фантазии обращаются на придумывание подробностей.

[1] 12 футов = 3,6 *м*.
[2] 70 фунтов = 28,7 *кГ*.

Эта твёрдая, ни на чём не основанная вера в возможность получения дарового источника энергии поразительна в особенности потому, что у людей науки мы, наоборот, постоянно встречаем противоположное убеждение о невозможности perpetuum mobile. Учёные, способствовавшие развитию механики, обыкновенно принимали эту невозможность как постулат, как нечто, не требующее доказательств.

...Появление в XVII столетии массы заявлений о будто бы найденном решении задачи о вечном движении вызвало потребность в ясности и простом доказательстве того, что устройство машины, служащей непрерывным источником работы, противоречит основным законам механики. Одно из первых доказательств этого рода принадлежало знаменитому математику Лагиру и было сообщено Парижской академии наук в 1678 г. Так как, несмотря на это изобретатели постоянно обращались в Академию с заявлениями о том, что ими найдено perpetuum mobile, и с просьбами о рассмотрении таких изобретений, то в 1755 г. Академия постановила оставлять без ответа все заявления и предложения, касающиеся perpetuum mobile. Однако эта мера не достигла своей цели и не остановила потока фантастических предложений. И теперь ещё каждому профессору механики беспрестанно приходится иметь дело с изобретателями подобных химер. По своему личному опыту я должен сказать, что это почти всегда лица очень почтенные, добросовестно преданные идее, но увлечённые ею так сильно, что они абсолютно глухи к доводам рассудка. На них не действуют не только словесные, логические доказательства, но даже такое сильное фактическое доказательство, которое им представляют своей полной инертностью продукты их изобретательности, изготовленные их собственными руками. Мне приходилось видеть изобретателей, только что окончивших, после долгих трудов, свой perpetuum mobile. Абсолютная неподвижность этого прибора нисколько не смущает изобретателя, который обыкновенно объясняет её самым маловажным обстоятельством: или размеры прибора недостаточны, или один из зубцов многочисленных зубчатых колёс механизма не вполне верен. Как только изобретатель получит возможность, он немедленно приступит к повторению своего механизма в большем масштабе или с более точными зубьями и вполне уверен в будущем успехе. Здесь мы уже имеем дело с материалом, интересным не для механики, а для психологии.

...С точки зрения динамики вопрос о perpetuum mobile крайне прост и вполне разрешается законом сохранения энергии. При этом вовсе не нужно рассматривать отдельно различные предложенные конструкции, а можно сделать сразу общее заключение для всех.

---

## ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

**4.** 3. 1,85 $\frac{км}{час}$.

**4а.** 3. 24 *см*.

**5.** 7. Через 0,5 часа после отправления второго поезда.

**7.** 1. 25 час. 2. 25 $\frac{км}{час}$. 3. 15 $\frac{км}{час}$; 13 $\frac{км}{час}$.

**11.** 1. $\sim$ 2,6 *м*; 1,5 *м*. 2. 400 $\frac{м}{сек}$; 2 *км*.

**12.** 1. $\sim$9,3 $\frac{м}{сек}$; $\sim$14 $\frac{м}{сек}$; $\sim$17 $\frac{м}{сек}$; $\sim$11,9 $\frac{м}{сек}$. 2. 4 $\frac{м}{сек}$; 12 $\frac{м}{сек}$; 8 $\frac{м}{сек}$.

**15.** 2. 1 $\frac{м}{сек^2}$. 4. 60 $\frac{см}{сек}$; $\sim$26,7 $\frac{см}{сек^2}$.

**16.** 2. 0,8 $\frac{м}{сек^2}$ 3. 10 сек.

**18.** 3. 72 *см*. 4. 3 *см*. 5. 108 *м*. 6. 160 сек; 640 *м*. 7. 330 *м*. 8. 12 $\frac{см}{сек^2}$. 9. 500 000 $\frac{м}{сек^2}$; 0,0016 сек.

**19.** 1. 19,6 *м*. 2. $\sim$ 0,4 сек. 3. $\sim$ 19 *м*. 4. 14,7 *м*. 5. $\sim$ 982 $\frac{см}{сек^2}$.

**20.** 1. 12 $\frac{м}{сек}$; 0,6 $\frac{м}{сек^2}$. 2. 135 *м*.

**21.** 5. 8 сек. 6. 7 сек.

**24.** 5. $\sim$0,36.

**26.** 5. $\sim$370 *кГ*. 6. 10 *кГ*.

**27.** 3. $\sim$167 *кГ*; $\sim$133 *кГ*.

**28.** 2. На расстоянии 25 *см* от правого конца.

**29.** 8. На расстоянии ~21 *см* от центра большого шара. 10. В медной пластинке на расстоянии ~0,27 её длины от линии скрепления. 11. На расстоянии $\frac{R}{6}$ от центра диска. 13. 84,15 *Г*. 14. 10 *кГ*. 15. ~970 *кГ*. 16. 10 *кГ*

**30.** 2. $14\frac{см}{сек^2}$; 7 *м*; $0,7\frac{м}{сек}$; $140\frac{см}{сек}$.

**32.** 1. а, г, д—верны. 4. 5000 *дн*. 5. 25 *г*. 6. $19,6\frac{см}{сек^2}$. 7. 3000 *дн*; 2000 *дн*. 8. 90 *см*. 9. 200 *дн*. 10. 1 820 000 *дн*. 11. 128 *кГ*. 12. 50 *кГ*. 13. 12 500 *кГ*. 15. Не выдержит. 16. 14,4 *кГ*; 13,6 *кГ*; 21 *кГ*; 7 *кГ*; 0. 17. 1080 *кГ*.

**33.** 3. Правая тележка пройдёт 0,9 *м*. 5. а) $20\frac{см}{сек^2}$; б) 20 000 *дн*; в) 20 000 *дн* г) влево — 20 000 *дн*, вправо — 40 000 *дн*. 6. При ускоренном движении:

на паровоз по направлению движения 2250 *кГ*, против 1250 *кГ*
„ 1-й вагон „ „ „ 1000 *кГ*, „ 600 *кГ*
„ 2-й „ „ „ „ 500 *кГ*, „ 100 *кГ*

Сила натяжения 1-го сцепления 1000 *кГ*, 2-го — 500 *кГ*.
При равномерном движении:

на паровоз по движению и против движения 450 *кГ*
„ 1-й вагон „ „ „ „ „ 200 *кГ*
„ 2-й „ „ „ „ „ „ 100 *кГ*

7. На первый груз 120 000 *дн* вертикально вверх и 117 600 *дн* вниз
„ второй „ 120 000 *дн* „ „ „ 122 500 *дн* „

Сила натяжения нити 120 000 *дн*. 8. $\frac{1}{10^{22}}\frac{см}{сек^2}$; 3125 лет.

**38.** 3. 3300 *кГм*.

**39.** 3. ~590 *вт*. 7. ~33 сек.

**41.** 1. а) 40 000 *э*; б) 40 000 *э*. 3. $375\cdot10^8$ *э*. 4. $\sim37\cdot10^9$ *э*. 6. Нет. 7. $6\cdot10^8$ *дн*. 9. Через 3 сек. $W_k=5\cdot10^7$ *э*; $W_n=75\cdot10^7$ *э*.

---

# ОГЛАВЛЕНИЕ

*Александр Васильевич Пёрышкин*
*Вильгельм Вильгельмович Крауклис*

КУРС ФИЗИКИ, Ч. I

Редактор *В. М. Дуков*
Обложка художника *Б. Н. Гутентога*
Художественный редактор *П. В. Любарский*
Технический редактор *Н. Н. Махова*
Корректоры *Т. М. Графовская*
и *Н. И. Котельникова*

* * *

Сдано в набор 31/VII 1956 г. Подписано к печати 14/XII 1956 г. $60\times92^1/_{16}$. Печ. л. 10.
Уч.-изд. л. 9,38. Тираж 500 тыс. экз.

* * *

Учпедгиз. Москва. Чистые пруды, 6.
Горьковская областная типография,
г. Горький, ул. Фигнер, 32. Заказ № 4602.
Цена без переплёта 1 р. 20 к. Переплёт 75 к.