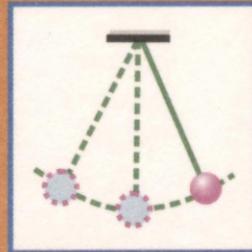
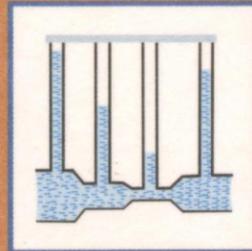
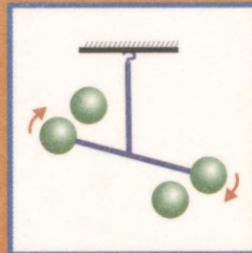
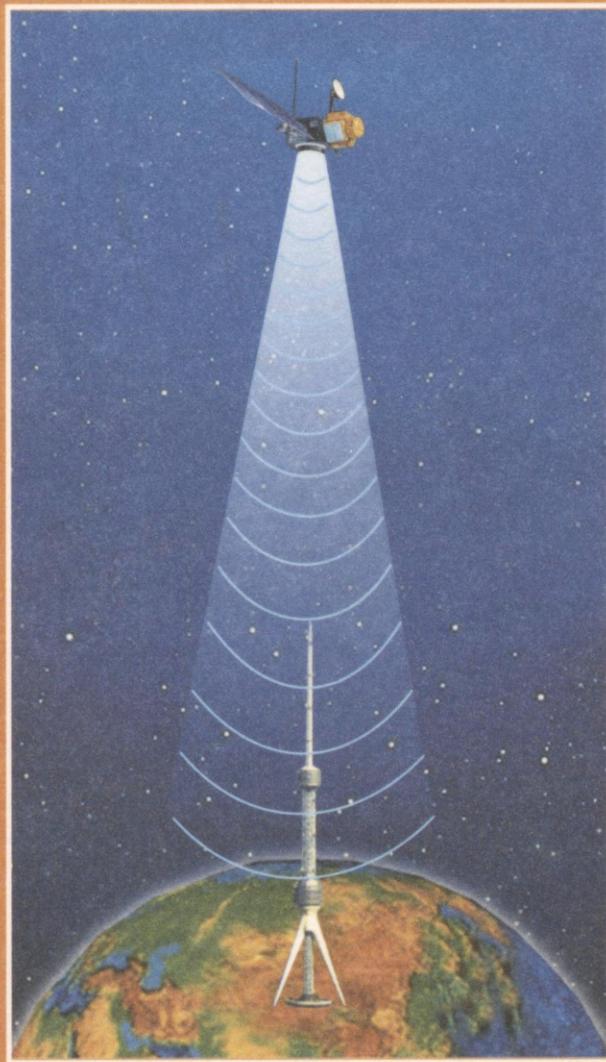
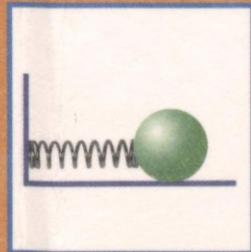
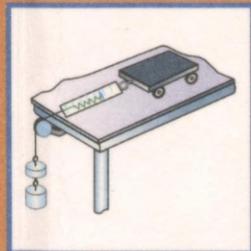
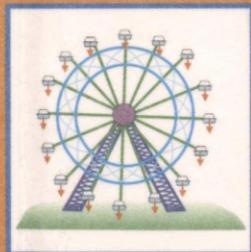
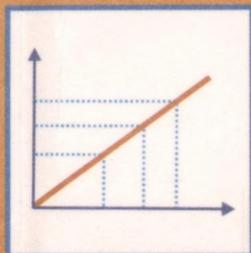


У 51818  
3

# ФИЗИКА 7



П. ХАБИБУЛЛАЕВ, А. БОЙДЕДАЕВ, А. БАХРАМОВ

# ФИЗИКА

7 класс

## МЕХАНИКА

Учебник для 7 класса  
школ общего среднего образования

*Издание 3-е,  
исправленное и дополненное*

Утвержден Министерством народного  
образования Республики Узбекистан

Государственное научное издательство  
“O‘zbekiston milliy ensiklopediyasi”  
Ташкент – 2013

УДК: 53(075) —  
22.3  
Х-12

*Физика*  
Ответственный редактор:

К. Турсунметов – доктор физико-математических наук,  
профессор Национального университета.

Рецензенты:

- Х. Махмудова – заведующая кафедрой «Физика и методика  
обучения», кандидат педагогических наук, до-  
цент;
- З. Сангирова – главный методист отдела «Естественные и  
точные науки» Республиканского центра об-  
разования;
- А. Рустамов – преподаватель физики школы №54 Фер-  
ганского района Ферганской области;
- Дж. Рахматов – преподаватель физики школы №48 Якка-  
сарайского района г. Ташкента.

Условные обозначения:



– выучите наизусть определения и выводы;



– запомните формулу;



– опорные понятия;



– вопросы и задания;

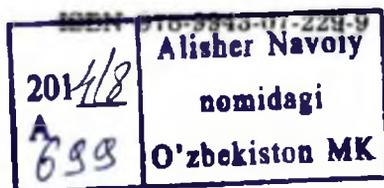


– примечание;



– порядковый номер упражнения.

Издано за счет средств Республиканского целевого  
книжного фонда для сдачи в аренду.



© Государственное научное издательство  
“O'zbekiston milliy ensiklopediyasi” 2005, 2009, 2013.

*У51818  
3*

## ВВЕДЕНИЕ

В 6 классе вы познакомились с физическими величинами, строением вещества, механическими, тепловыми, световыми и звуковыми явлениями, тем самым получили первоначальные представления о физике.

Теперь вы приступаете к более подробному изучению разделов физики. В частности, в 7 классе вы будете изучать механику.

Что означает слово «механика»? Что изучает данный раздел физики?

Люди с древнейших времен строили себе жилища, охотились на животных, занимались земледелием. В своей деятельности они применяли такие простые механизмы, как рычаг, наклонная плоскость, клин, колесо.

В V в. до н. э. в армии Древних Афин использовались стенобитные машины – тараны, строились катапульты.

С течением времени люди создавали более сложные приспособления – строили мосты и дамбы, изобретали различные кустарные орудия, производили всевозможные изделия – от простых лодок до огромных кораблей, от телеги до велосипеда, автомобиля, ракеты (рис. 1).

Создание различных машин и механизмов, возрастание потребности в них вызывали необходимость накопления и совершенствования.



Рис. 1. С течением времени механизмы все более совершенствовались.

вания знаний. Таким образом происходило формирование механики как науки.



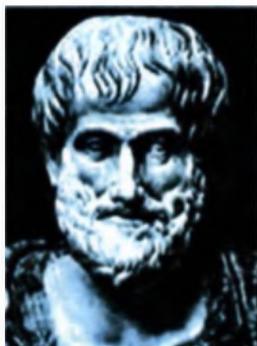
**Слово «механика»** происходит от греческого «*μηχανη*» и означает *учение о машинах*.

В настоящее время механика изучает не только механизмы и машины, но и взаимодействие материальных тел, их движение в результате этого взаимодействия.



**Механика** изучает материальные тела и движение тел в результате их взаимодействия.

### Сведения из истории механики



Аристотель

Древнегреческий ученый **Аристотель** (384–322 гг. до н.э.) впервые использовал слово «механика» в своей книге «Физика» и ввел его в научный оборот. В этой книге он привел также сведения о том, что Земля находится в центре Вселенной, а вокруг нее вращаются Солнце и Луна, что тело, подброшенное вверх, падает на землю, описал работу рычага и других механизмов. Учение Аристотеля о движении тел в те времена считалось передовым.



Архимед

Еще один древнегреческий ученый **Архимед** (287–212 гг. до н.э.) первым использовал математику для анализа механических явлений. Он объяснил принцип работы рычага, условия плавания тел с помощью математических расчетов.

В средние века развитие механики поднялось на новую ступень. В этот период в развитие механики большой вклад внесли ученые Средней Азии.

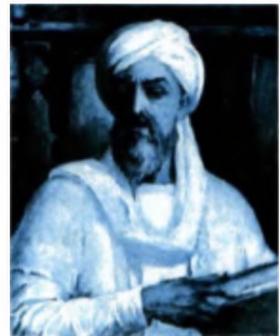
Уроженец древнего города Кят (столица Хорезма, ныне Берунийский район) **Абу Райхан Беруни** (973–1048) в своих трудах оставил сведения о силе земного притяжения, свободном падении тел, тяжести, простых механизмах, энергии и ее превра-

щениях. В частности, земное притяжение он объяснял тем, что Земля имеет форму шара и поэтому все тела своей тяжестью тяготеют к ее центру. По его мнению, сферическая форма водной поверхности морей и океанов также связана с притяжением тел к Земле. Тяготение тел к центру Земли может служить причиной внутренних движений Земли, т.е. стремления веществ, входящих в ее состав, занять свои природные места, в результате чего возникают различные движения на земной поверхности. Свообразными методами Беруни рассчитал радиус, длину окружности, площадь и объем земного шара, изобрел глобус, теоретически доказал существование американского континента, вращение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.



Абу Райхан Беруни

Современник Беруни, уроженец селения Афшона близ г. Бухары Абу Али ибн Сина (980–1037) оставил ценные сведения о механическом движении, относительности движения, взаимодействии тел, вращательном движении, центробежной силе, линейной скорости, атмосферном давлении.



Абу Али ибн Сина

Ученый отмечал, что тела совершают движение под действием силы, при этом чем больше масса тела, тем большая сила требуется для его движения. Тела разной величины под действием одинаковой силы набирают различную скорость. Так, он говорил: «Возьми два шара. Если их величины разные, а прикладываемые к ним силы одинаковые, то скорости их будут различными. Во сколько раз большой шар больше маленького, во столько же раз будет меньше и его скорость».

Притяжение тел к Земле Ибн Сина объяснял на следующем примере: «Если кто-то вырвет столб из-под виноградной опоры, говорят, что он свалил опору. На самом же деле это не человек свалил опору, а она сама рухнула под действием своей тяжести. Столб мешал этому. Как только столб вырвали из-под опоры, тяжесть опоры сделала свое дело». Это высказывание Абу Али ибн Сины получило подтверж-

дение спустя семь веков открытием закона всемирного тяготения Ньютоном, который объяснил данное явление на примере падения яблока.

В XVII в. итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642) открыл причины невозможности внезапной остановки движущегося тела – закономерности инерции тел, земного притяжения тел, ведущего к их свободному падению, колебаний маятника.

Английский ученый Исаак Ньютон (1643–1727) на основе открытий Галилея и современных ему ученых в области механики, а также в результате собственных наблюдений и исследований открыл законы о механическом движении и взаимодействии материальных тел, которые широко используются и в настоящее время.

---



1. Что означает слово «механика»?
2. По какому пути шло формирование механики как науки? В чем заключалась заслуга Аристотеля и Архимеда?
3. Расскажите о вкладе в развитие механики ученых Средней Азии.
4. Что вы знаете об открытиях Галилея и Ньютона в области механики?
5. Каких еще ученых, внесших вклад в развитие механики, вы знаете?

# ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

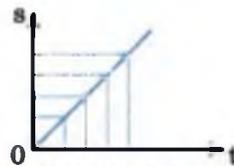
Изучение механики начнем со знакомства с основами кинематики. Кинематика изучает движение тел независимо от их масс и действующих на них сил. Слово «кинематика» происходит от греческого «*kinematos*» и означает *движение*.

При знакомстве с кинематикой вы получите общие сведения о необходимых понятиях (материальная точка, система отсчета, траектория) и величинах (путь, перемещение, скорость, ускорение). Они будут использоваться и при дальнейшем изучении механики. В этом разделе вы узнаете, как изучается движение тел, и научитесь решать простые задачи по кинематике.

## Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИЖЕНИИ



## Глава II. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ



## Глава III. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ





## Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИЖЕНИИ

### § 1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ

#### Механическое движение

Постоянно наблюдаемое вокруг нас движение тел – велосипеда, автомобиля и людей, полет птиц, самолетов и ракет, плавание рыб, акул и дельфинов, вращение Земли вокруг Солнца, Луны – вокруг Земли – все это примеры движения тел (рис. 2).

Движение тел подчиняется определенным законам. Например, ученые, изучив закономерности движения небесных тел, научились находить их положения в пространстве в любой момент времени, определять время наступления солнечных и лунных затмений.

Движение любого тела наблюдается относительно другого тела. Например, автомобиль движется относительно неподвижных деревьев и домов, вода в реке – относительно ее берегов, самолет в небе – относительно земли и облаков.



Рис. 2. Механическое движение тел.



**Изменение с течением времени положения тела в пространстве по отношению к другим телам называется механическим движением.**

## Относительность движения

Обычно говорят, что тело неподвижно, если его положение относительно Земли не меняется. Но действительно ли неподвижны книга на столе, мебель в комнате, дома, автомобили, стоящие на обочине? Нет, они вместе с Землей движутся вокруг Солнца.

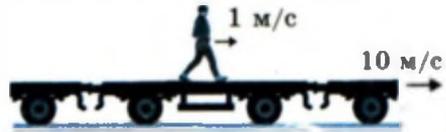


Рис. 3. Движение человека по платформе относительно.

Пусть человек идет по платформе, движущейся со скоростью 10 м/с, в направлении ее движения со скоростью 1 м/с (рис. 3). Тогда скорость человека по отношению к Земле составляет  $10 \text{ м/с} + 1 \text{ м/с} = 11 \text{ м/с}$ . Значит, при изучении движения тела нужно учитывать, по отношению к какому телу оно рассматривается.



**Движение всех тел относительно, состояние покоя тела также является относительным.**

## Тело отсчета

Для учета относительности движения введено понятие «тело отсчета». Например, движение или покой человека и автомобилей рассматривается относительно Земли. В этом случае Земля является телом отсчета. Движение или покой всех других тел в окружающем нас пространстве рассматривается относительно этого тела отсчета. Если говорить о движении Земли вокруг Солнца, то телом отсчета будет Солнце.



**Тело, относительно которого наблюдается движение или состояние покоя, называется телом отсчета.**

В приведенном выше примере с платформой скорость человека будет составлять 1 м/с, если в качестве тела отсчета рассматривается платформа. Если же в качестве тела отсчета взять Землю, скорость человека будет 11 м/с.

При движении автомобиля, поезда и других тел в качестве тела отсчета вместо Земли можно взять неподвижно стоящие на ее поверхности здание, дерево и др. Например, если движение автомобиля наблюдается относительно дерева на обочине дороги, то телом отсчета можно взять это дерево.

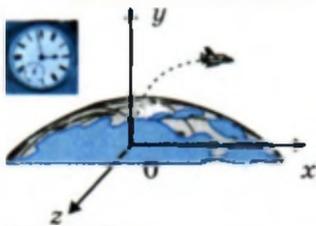
## Система отсчета

Для более подробного изучения движения тел, кроме тела отсчета, используются система координат и приборы для измерения времени. О том, что такое система координат, вы узнали из курса математики в 6 классе.

При изучении движения некоторого тела система координат неподвижно соединяется с телом отсчета. Положение движущегося тела в начальный момент наблюдения принимается за начало координат. При этом с течением времени измеряется расстояние, пройденное телом от начала координат.



**Тело отсчета, соединенная с ним система координат и прибор для измерения времени составляют систему отсчета.**



**Рис. 4.** Система отсчета, состоящая из земного шара, системы координат и времени.

При рассмотрении старта ракеты с Земли система отсчета состоит из земного шара, системы координат и часов (рис. 4). При этом земной шар – тело отсчета, место старта ракеты – начало координат, часы – прибор для измерения времени.

Например, автомобиль «Ласетти» за 10 мин удалился от дома на 8 км. При этом и состояние покоя автомобиля (дома), и его движение по дороге относительно к Земле. Для «Ласетти» телом отсчета является Земля. Водитель может определить расстояние, пройденное автомобилем за 10 мин или любой произвольный период времени, с помощью часов и спидометра. При этом дом – начало координат, а пройденные 8 км – расстояние, которое проехал автомобиль относительно начала координат. Значит, при движении автомобиля «Ласетти» Земля является телом отсчета, дом – началом координат, а часы водителя – прибором для измерения времени. Вместе они составляют систему отсчета.



**Опорные понятия:** механическое движение, относительность движения, тело отсчета, система координат, система отсчета.



1. Какое движение называется механическим? Приведите примеры.
2. Почему движение и состояние покоя тел относительны?
3. Что такое тело отсчета? Приведите примеры.
4. Вы едете в автобусе. Что является телом отсчета в этом случае?
5. Что называется системой отсчета? Объясните на примерах.

## § 2. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

### Безграничность пространства

Окружающая нас атмосфера, пустота за ней составляют пространство. Существуют ли границы пространства?

Древнеримский ученый Лукреций Кар (I в. до н.э.) в своей книге «О природе вещей» писал, что мир состоит из пространства и находящихся в нем тел, которые взаимосвязаны друг с другом, при этом пространство безгранично.

Позже итальянский ученый Джордано Бруно (1518–1600) говорил о том, что пространство безгранично, что существует множество небесных тел, подобных земному шару. За эти взгляды инквизиция приговорила Бруно к сожжению на костре.

Галилей и Ньютон следующим образом представляли себе пространство: пространство безгранично, все его направления равносильны, все точки однородны, частично оно заполнено материей, частично пустое.

Представьте себе, как обширен наш мир. Скорость светового луча составляет 300 000 км/с. С такой скоростью свет приходит на Землю от Луны за 1,3 с, от Солнца за 8,3 мин, от ближайшей к Земле звезды – за четыре года. Попытаемся вычислить расстояние  $s$  от Земли до ближайшей к ней звезды:

$$\begin{aligned} \text{Дано:} \\ t = 4 \text{ года} \approx 126\,230\,400 \text{ с;} \\ v = 300\,000 \text{ км/с} = \\ = 300\,000\,000 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Найти:} \\ s - ? \end{aligned}$$

Формула:

$$s = vt.$$

Решение:

$$\begin{aligned} s &= 300\,000\,000 \cdot \\ &\cdot 126\,230\,400 \text{ м} = \\ &= 37\,869\,120\,000\,000\,000 \text{ м} = \\ &= 37\,869\,120\,000\,000 \text{ км.} \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } s = 37\,869\,120\,000\,000 \text{ км.}$$

Свет от удаленных от Земли видимых нам звезд доходит до нас за сотни и даже за тысячи лет. Даже трудно себе представить, насколько они далеки от нас. Помимо видимых нашему глазу звезд существует бесчисленное количество звезд, которых мы не видим. Система звезд, относительно близких друг к другу, составляет галактику. По мнению ученых, в нашей галактике, в которой находится Солнечная система, имеется более 150 миллиардов звезд. В безграничном пространстве существуют миллиарды галактик.

Таким образом, пространство настолько обширно, что не имеет границ.



Рис. 5. Прямолинейное движение поезда одномерное.

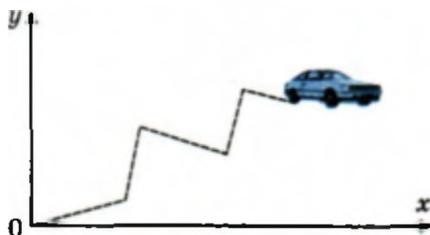


Рис. 6. Движение автомобиля на плоскости двумерно.

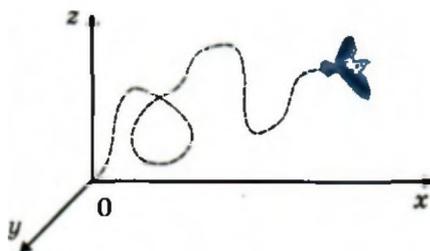


Рис. 7. Движение птицы в пространстве трехмерно.

### Трехмерность пространства

На прямой дороге автомобиль совершает прямолинейное движение. Такое движение считается одномерным. Движение поезда на прямолинейном участке пути также можно условно назвать одномерным. Обычно одномерное движение изображается прямой линией на оси координат (рис. 5).

Автомобиль, едущий по прямой дороге, на перекрестке может повернуть налево или направо, т.е. отклониться от прямолинейного движения. Если будем считать земную поверхность плоскостью, то движение человека, велосипедиста, автомобилей на этой плоскости будет двумерным. Двухмерное движение тела, например автомобиля, можно изобразить на плоскости координат (рис. 6).

Птицы могут передвигаться по земле, летать по воздуху, т.е. в пространстве. Движение птиц на земле двумер-

ное, а полет в воздухе – трехмерен. Трехмерное движение птиц в пространстве можно изобразить в системе координат (рис. 7).

Полет самолетов и ракет, камня, подброшенного вверх, плавание рыб в воде также трехмерное.

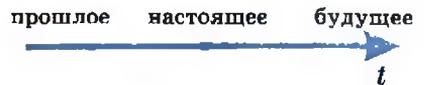
Таким образом, пространство обладает следующими свойствами:



**Пространство безгранично, трехмерно и однородно во всех точках и направлениях.**

### Одномерность времени

Движущееся тело меняет свое положение в пространстве с течением времени. Время одномерно, оно равномерно течет только вперед (рис. 8). Его невозможно обратить. Например, вы родились 13 лет тому назад. С тех пор в вашей жизни произошло множество событий. Вы не сможете изменить их, обратив течение времени. Точно так же вы не сможете вернуться в минувший день, вы сможете изменить только свое будущее. Итак, время обладает следующими свойствами:



**Рис. 8.** Время одномерно и течет только вперед.



**Время непрерывно, одномерно, все его моменты однородны, оно равномерно течет только вперед.**



**Опорные понятия:** пространство, галактика, одномерное, двухмерное и трехмерное движение, трехмерность пространства, одномерность времени.



1. Какие мысли о пространстве высказывали древние и средневековые ученые?
2. Обоснуйте на примерах обширность и безграничность пространства.
3. Приведите примеры одномерного и двухмерного движения.
4. Почему пространство считается трехмерным?
5. Почему время непрерывно, одномерно и течет только вперед?

## § 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ

### Материальная точка

При изучении движения тел используется ряд упрощений. Одно из них состоит в том, что, пренебрегая размерами движущегося тела, его принимают за материальную точку.



*Материальной точкой называется тело, размерами и формой которого при наблюдаемом движении можно пренебречь.*



**Рис. 9.** Движение и траектория тел, рассматриваемых как материальные точки.

При изучении движения автомобиля, покрывающего расстояние 10 км, его можно принять за материальную точку, если его длина 4 м. Действительно, длина пути в 2500 раз превосходит его длину. Точно так же самолет, летящий на далекое расстояние, и мяч, который летит по полю, можно считать материальными точками (рис. 9).



**Рис. 10.** Тела не всегда можно рассматривать как материальные точки.

Одно и то же тело в одном случае можно считать материальной точкой, а в другом — нет. Например, ученик, направляющийся в школу, расположенную от его дома на расстоянии 1 км, может быть принят за материальную точку. Но того же ученика, выполняющего утреннюю гимнастику, нельзя принять за материальную точку (рис. 10).

Поезд, движущийся из одного города в другой, можно рассматривать как материальную точку по отношению к расстоянию между городами. Но его нельзя принять за материальную точку по отношению к станции на его пути.

Земной шар велик. Однако при изучении вращения Земли вокруг Солнца ее также можно принять за материальную точку.

## Траектория

Когда пишут мелом на доске, по заснеженной дороге движется автомобиль, по небу летит метеор, мы ясно различаем оставляемый ими след. След, который оставляют мел, автомобиль, метеор, – это траектория их движения.

Движущиеся тела не всегда оставляют видимый след. Например, метеор, летящий по небу, оставляет след, но спортсмен, прыгающий на лыжах с трамплина, следа не оставляет. Хотя летящий после удара мяч, спортсмен, машина, самолет в небе и не оставляют видимого следа, можно представить себе невидимый след их движения в виде сплошной линии.



**Непрерывная линия, описываемая в пространстве движущейся материальной точкой (след, который она оставляет), называется траекторией движения.**

## Путь и перемещение

Траектория – это физическое понятие. Для оценки величины траектории принята физическая величина – путь.



**Расстояние, пройденное телом вдоль траектории его движения, называется *путем* и обозначается буквой *s*.**

В некоторых случаях представляет интерес не сам путь, проделанный телом, а направленный отрезок, соединяющий начальную и конечную точки его траектории.



**Направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения движущегося тела, называется *перемещением*.**

Допустим, что тело, перемещаясь из точки *A* в точку *B*, проделало вдоль криволинейной траектории путь 100 м. Но кратчайшим путем из точки *A* в точку *B* является отрезок *AB*. Его длина меньше 100 м, например 60 м. Тогда перемещение – 60 м (рис. 11).

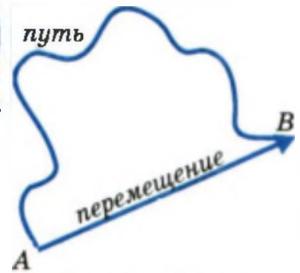


Рис. 11. Путь и перемещение.

Например, по карте можно найти с использованием масштаба, что величина перемещения из Ташкента в Андижан 245 км. Но путь из Ташкента в Андижан на автомобиле составляет не менее 380 км.

Если тело совершает прямолинейное движение, то путь совпадает с перемещением.

### Поступательное движение

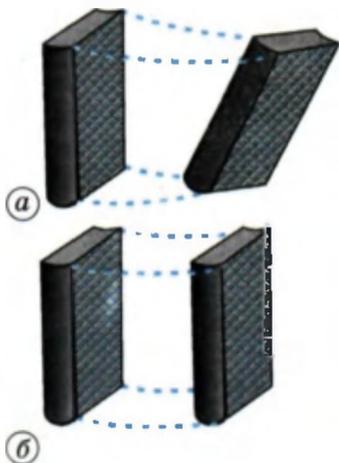


Рис. 12.

Непоступательное (а) и поступательное (б) движение книги.

Книгу, стоящую на столе, можно передвигать с места на место различным образом (рис. 12). В случае *а* траектория движения ребер книги различна. В случае *б* траектория ребер одинакова, т.е. их можно наложить друг на друга. Такого рода движение называется поступательным. В этом случае траектория не только ребер, но и любых двух точек книги будет одной и той же.

Движение рамы велосипеда, кузова автомобиля по ровной дороге также будет поступательным.



**При поступательном движении прямая линия, проведенная через любые две точки движущегося тела, остается параллельной самой себе.**



Рис. 13. Поступательное движение кабинок «чертова колеса».

Сумка, которую мы поднимаем с пола, ступеньки движущегося эскалатора совершают поступательное движение.

Кабинки «чертова колеса» в парке совершают вращательное движение (рис. 13). Но в то же время они совершают поступательное движение, так как прямая линия, проведенная через две произвольные точки кабины, перемещается параллельно самой себе.

При изучении движения тела, совершающего поступательное движение, достаточно рассмотреть движение лишь одной его точки. Поэтому тело, совершающее поступательное движение, можно рассматривать как материальную точку.



**Опорные понятия:** материальная точка, траектория, путь, перемещение, поступательное движение.



1. Что называется материальной точкой?
2. В каких случаях автомобиль, мяч, самолет можно рассматривать как материальные точки?
3. Что такое траектория?
4. Что такое путь и как он обозначается?
5. Что такое перемещение? Чем путь отличается от перемещения?
6. Какое движение называется поступательным?
7. Обоснуйте поступательное движение кабинок «чертова колеса» на рис. 13.

## § 4. ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ДЕЙСТВИЯ НАД НИМИ

### Скалярные величины

Физические величины делятся на две группы – скалярные и векторные.



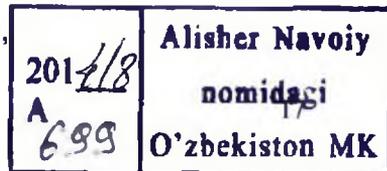
**Величины, которые определяются только численными значениями, называются скалярными.**

Такие физические величины, как объем, путь, масса, энергия, являются скалярными. Действия над ними совершаются, как над обыкновенными числами. Например, масса одного тела  $m_1 = 8$  кг, масса второго  $m_2 = 4$  кг, тогда совокупная масса обоих тел равна:

$$m_1 + m_2 = 8 \text{ кг} + 4 \text{ кг} = 12 \text{ кг}.$$

Разность масс:

$$m_1 - m_2 = 8 \text{ кг} - 4 \text{ кг} = 4 \text{ кг}.$$



таким же образом можно определить, во сколько раз масса первого тела больше массы второго.

Кроме того, массу тела можно умножать и делить на число, не равное 0. Например, если  $m = 12$  кг,  $3m = 12$  кг  $\cdot 3 = 36$  кг;  $m : 3 = 12$  кг  $: 3 = 4$  кг.

## Векторные величины

При определении некоторых физических величин знания их численных значений недостаточно. Для этого важно знать еще и направление. Например, недостаточно сказать, что тело переместилось на расстояние 5 м. При этом должно быть известно и направление перемещения.

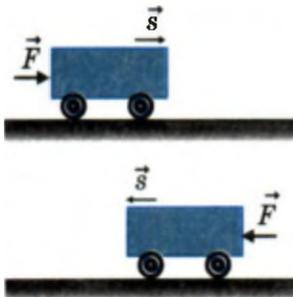


Рис. 14. Направление движения тележки зависит от направления силы.

Это позволит получить представление о том, откуда и куда переместилось тело.

Допустим, что на тележку, стоящую на столе, действует сила  $F = 1$  Н. Если сила действует в направлении слева направо, тележка будет двигаться вправо, а если сила действует справа налево, то и тележка будет двигаться влево (рис. 14).

Такие физические величины, как сила, скорость, перемещение, – векторные величины. При их изучении, кроме их численных значений, важно знать и направление.



**Величины, которые определяются численными значениями и направлением, называются векторными.**

Обычно над векторными величинами ставится стрелка. Например, сила –  $\vec{F}$ , скорость –  $\vec{v}$ , перемещение –  $\vec{s}$ . Векторные величины изображаются отрезками, направленными из одной точки в другую. Длина отрезка выражает численное значение векторной величины:

$$|\vec{F}| = 2 \text{ Н}, |\vec{v}| = 10 \text{ м/с}, |\vec{s}| = 5 \text{ м}$$

или  $F = 2 \text{ Н}, v = 10 \text{ м/с}, s = 5 \text{ м}.$

## Сложение и вычитание векторных величин

Действия над векторными величинами нельзя совершать так же, как над простыми числами. Допустим, что тело из точки  $A$  переместилось в точку  $B$ , пройдя прямолинейный путь в 4 м (рис. 15). Обозначив пройденный телом путь  $s_1$ , получим  $AB = s_1 = 4$  м. При этом пройденный телом путь  $s_1$  будет равен перемещению, т.е. численному значению векторной величины  $\vec{s}_1$ :  $s_1 = |\vec{s}_1|$ .

Пусть далее из точки  $B$  тело переместится в точку  $C$ , пройдя прямолинейный путь в 3 м. Тогда  $BC = s_2 = 3$  м. В этом случае также пройденный телом путь  $s_2$  будет равен перемещению, т.е. численному значению векторной величины  $\vec{s}_2$ :  $s_2 = |\vec{s}_2|$ .

Тело может также переместиться из точки  $A$  в точку  $C$  напрямую. Так как движение прямолинейное, то и в этом случае путь будет равен перемещению:  $s = |\vec{s}|$ .

В первом случае перемещение тела из точки  $A$  в точку  $B$ , а из точки  $B$  – в точку  $C$  будет иметь вид:  $\vec{s}_1 + \vec{s}_2$ . Это перемещение равно перемещению  $\vec{s}$  из второго случая:

$$\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{s}. \quad (1)$$

На основе формулы (1) и перемещений, изображенных на рис. 15, можно следующим образом сформулировать правило сложения двух векторных величин:

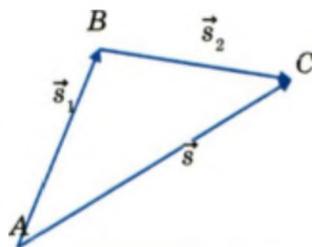


Рис. 15. Сложение векторов  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$ .

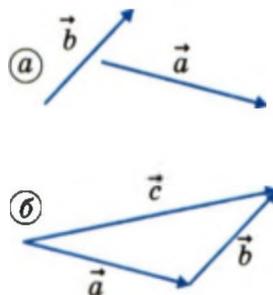


Рис. 16. Векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  (а) и их сложение (б).

Чтобы сложить два вектора, нужно конец первого вектора соединить с началом второго вектора и от начала первого вектора провести вектор, направленный к концу второго вектора. Этот вектор – есть сумма двух векторов.

Пусть даны векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  произвольного направления. Определение их суммы  $\vec{a} + \vec{b}$ , т.е. вектора  $\vec{c}$  показано на рис. 16.

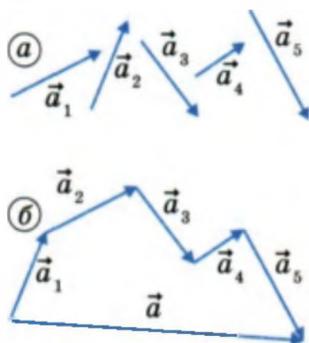


Рис. 17. Векторы  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \vec{a}_4, \vec{a}_5$  (а) и их сложение (б).

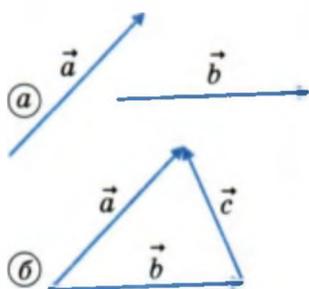


Рис. 18. Разность двух векторов.

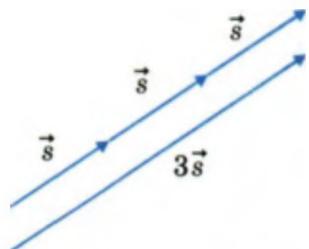


Рис. 19. Произведение вектора  $\vec{s}$  и числа 3.

Направленная прямая линия показывает не только направление физической величины, но и то, на сколько она больше в численном отношении. Чем больше длина направленной линии, тем больше значение физической величины.

Вышеописанным способом можно складывать не только два, но и большее количество векторов. Например, пусть даны векторы  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \vec{a}_4, \vec{a}_5$ , имеющие различное произвольное направление (рис. 17). При их сложении каждый раз начало следующего слагаемого вектора соединяется с концом предыдущего. Вектор  $\vec{a}$ , проведенный от начала первого вектора  $\vec{a}_1$  к концу последнего вектора  $\vec{a}_5$ , является суммарным. Сумма векторов записывается следующим образом:

$$\vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3 + \vec{a}_4 + \vec{a}_5 = \vec{a}. \quad (2)$$

Над векторными величинами можно также совершать действие вычитания. На рис. 18 показано, как из вектора  $\vec{a}$  можно вычесть вектор  $\vec{b}$ . Здесь:

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{c}. \quad (3)$$



Чтобы вычесть из одного вектора другой, нужно начала обоих векторов соединить в одной точке и от конца второго вектора провести вектор, направленный к концу первого вектора. Этот вектор — есть разность двух векторов.

### Умножение и деление векторных величин на число

Если тело покрывает путь  $\vec{s}$  в некотором направлении по прямой линии, его перемещение будет равно вектору  $\vec{s}$ :  $s = \vec{s}$ . Пусть это же тело еще два раза пройдет путь  $s$ , не меняя направления. Тогда пройденный им путь  $s$  составит  $s + s + s = 3s$ , а перемещение  $\vec{s} + \vec{s} + \vec{s} = 3\vec{s}$  (рис. 19).

Следовательно, при увеличении  $\vec{s}$  в 3 раза получится вектор  $3\vec{s}$ , и направление результирующего вектора не изменится.



**При умножении векторной величины на число ее значение увеличивается на величину, кратную этому числу, а направление не меняется.**

При этом число, на которое умножается векторная величина, должно быть положительным.

Точно так же векторную величину можно делить на положительное число, причем векторная величина должна делиться на это число без остатка.



**При делении векторной величины на число ее значение уменьшается на величину, кратную этому числу, а направление не меняется.**

### Проекция векторных величин

Пусть на тележку под некоторым углом к направлению ее движения действует сила  $\vec{F}$  (рис. 20). Каким будет значение силы, действующей на тележку в направлении ее движения?

Проведем вдоль направления движения тележки ось  $Ox$  так, чтобы точка  $O$  совпала с началом вектора  $\vec{F}$ . Из точки  $A$  на конце вектора  $\vec{F}$  опустим перпендикуляр в точку  $B$  на оси  $Ox$ . Полученный отрезок  $OB$  составит проекцию вектора  $\vec{F}$  на оси  $Ox$ . Сила, действующая на тележку в направлении ее движения, будет равна длине этой проекции. Например, допустим, что значение силы, действующей на тележку под некоторым углом, равно  $|\vec{F}| = 5\text{Н}$ , а проекция этой силы равна  $3\text{Н}$ . Тогда сила, действующая на тележку в направлении ее движения, будет равна  $3\text{Н}$ .

Определим проекцию произвольно направленного вектора  $\vec{a}$  на оси  $Ox$ . Для этого от начала  $A$  вектора  $\vec{a}$  и от его конца  $B$  опустим на ось  $Ox$  перпендикуляры  $AC$  и  $BD$ . Образовавшийся отрезок  $CD$  будет проекцией вектора  $\vec{a}$  на оси  $Ox$ .

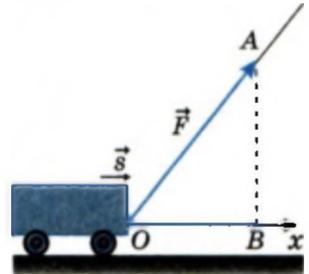


Рис. 20. Проекция силы, действующей на тележку.

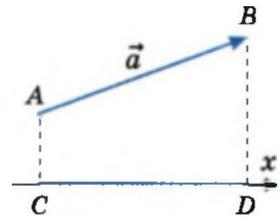


Рис. 21. Проекция произвольно направленного вектора.



**Опорные понятия:** скалярная величина, векторная величина, сумма векторов, разность векторов, умножение вектора на число, деление вектора на число, проекция вектора.



1. Какие физические величины называются скалярными?
2. Объясните на примерах векторные величины.
3. Как выполняется сложение векторных величин? Объясните на примерах.
4. Как выполняется вычитание одного вектора из другого?
5. Как выполняется умножение и деление векторных величин на число?
6. Как определяется проекция векторных величин?



1. Определите и запишите в тетради сумму изображенных на рис. 22 векторов:  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$ ;  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ ;  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  и  $\vec{c}$ ;  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$ ,  $\vec{a}_3$ ,  $\vec{a}_4$  и  $\vec{a}_5$ .

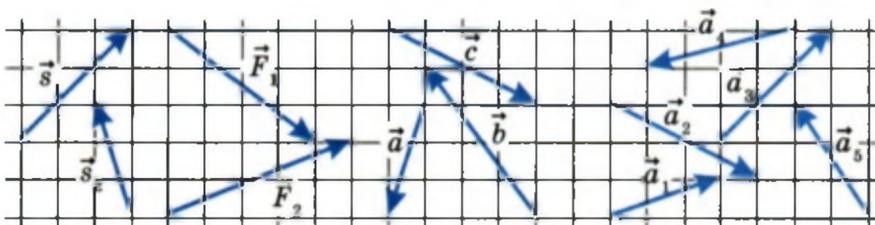


Рис. 22. Векторы, сумму и разность которых необходимо определить.

2. Определите и запишите в тетради разность векторов  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$ ;  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , приведенных на рис. 22.
3. Выполните умножение и деление векторов, изображенных на рис. 23: вектор  $\vec{F}$  умножьте на 2; вектор  $\vec{a}$  – на 5; вектор  $\vec{b}$  разделите на 3.

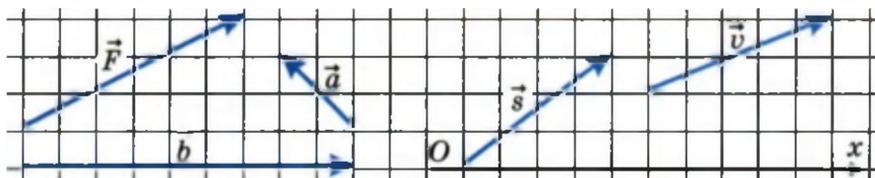


Рис. 23. Векторы, произведение, делимое и проекцию которых нужно определить.

4. Начертите в тетради проекцию векторов  $\vec{s}$  и  $\vec{v}$  на оси  $Ox$  (рис. 23).

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ I

- ◆ В разделе «Механика» курса физики изучаются тела и их движения в результате взаимодействия.
- ◆ Кинематика изучает движение тел независимо от их масс и действующих на них сил.
- ◆ Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве по отношению к другим телам.
- ◆ Движение и состояние покоя тел относительны.
- ◆ Движение и состояние покоя тел изучаются относительно тела отсчета.
- ◆ Тело отсчета, соединенная с ним система координат и прибор для измерения времени составляют систему отсчета.
- ◆ Пространство безгранично, трехмерно и однородно во всех точках и направлениях.
- ◆ Время непрерывно, одномерно, все его моменты однородны, оно равномерно течет только вперед.
- ◆ Во многих случаях при изучении движения тел их принимают за материальную точку, пренебрегая их размерами и формой.
- ◆ Непрерывная линия, описываемая в пространстве движущимся телом, называется траекторией движения.
- ◆ Путь – это расстояние, пройденное телом вдоль траектории его движения.
- ◆ Перемещение – это направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения движущегося тела.
- ◆ При поступательном движении прямая линия, проведенная через любые две точки движущегося тела, остается параллельной самой себе.
- ◆ Скалярная величина – это величина, определяемая только численным значением.
- ◆ Векторная величина – это величина, определяемая не только численным значением, но и направлением.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ I

1. В каком из приведенных случаев Земля рассматривается как материальная точка?
  - а) при вычислении длины экватора;
  - б) при вычислении пути, пройденного Землей по орбите вокруг Солнца;
  - в) при вычислении скорости движения точки экватора во время суточного обращения Земли вокруг своей оси;
  - г) при вычислении скорости движения Земли по орбите вокруг Солнца.
2. В каком из приведенных случаев тело можно считать материальной точкой?
  - а) при приближении поезда к станции;
  - б) при движении поезда между двумя городами;
  - в) при движении человека по комнате;
  - г) при движении человека, идущего по центру села;
  - д) при движении мяча по полю;
  - е) при определении диаметра мяча.
3. Мы оплачиваем проезд в такси за путь или за перемещение?
4. Мальчик бросил мяч на землю с высоты 1,5 м и поймал его после того, как тот ударился о землю и подпрыгнул на высоту 0,5 м. Найдите путь и перемещение мяча.
5. Вертолет пролетел в горизонтальном направлении 10 км на восток, затем 8 км на юг, затем 12 км на запад и после этого 8 км на север. Определите путь и перемещение вертолета.
6. Вставьте вместо точек нужные выражения и закончите определение:

Векторные величины – это ...

  - а) величины, определяемые только численным значением;
  - б) величины, определяемые только направлением;
  - в) величины, численными значениями которых можно пренебречь;
  - г) величины, не имеющие единиц и определяемые направлением;
  - д) величины, определяемые численными значениями и направлением.

## Глава II. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ



Движение большинства тел в окружающем нас пространстве не является равномерным, поэтому траектории их движения достаточно сложные. Самое простое механическое движение – это прямолинейное равномерное движение тел. В этой главе вы вначале изучите прямолинейное равномерное движение тел и получите краткие сведения о неравномерном движении. Затем вы приступите к более подробному изучению прямолинейного равнопеременного движения.

### § 5. ПОНЯТИЕ О ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

#### Равномерное движение

Проведем следующий опыт.

Пусть на тележке (рис. 24) установлена капельница, из которой равномерно капают капли. При отпускании тележки она придет в движение. При этом можно заметить, что расстояние между падающими каплями неодинаковое. Значит, тележка за одно и то же время проходила различные расстояния, т.е. она двигалась неравномерно.

Теперь немного изменим описанный выше опыт. Уменьшим подвешенный к тележке груз так, чтобы за равные промежутки времени расстояния между упавшими каплями были одинаковыми. В этом случае за равные промежутки времени капельница проходит одинаковые пути (рис. 25).

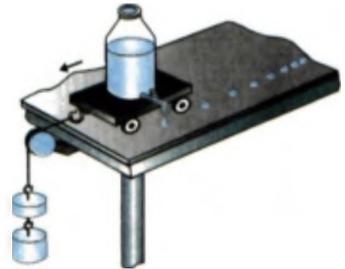


Рис. 24. Неравномерное движение тележки.

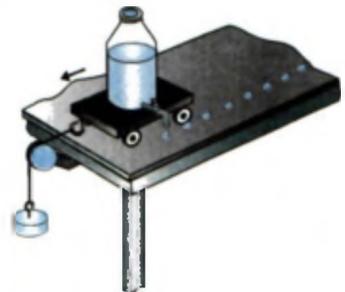


Рис. 25. Равномерное движение тележки.



Если тело за произвольные равные промежутки времени проходит равные пути, то такое движение называется *равномерным*.

Если, например, за каждую минуту автомобиль проходит путь 1,5 км, то за 2 мин он пройдет 3 км, за 5 мин – 7,5 км, за 10 мин – 15 км, за 30 мин – 45 км, за 1 час – 90 км.

Движение стрелок часов также может служить примером равномерного движения.

## Прямолинейное движение

В окружающем нас пространстве траектории движения тел чаще всего бывают криволинейными. Лишь в некоторых случаях на определенных участках пути тела совершают прямолинейное движение.



Если траектория движения тела – прямая линия, то такое движение называется *прямолинейным*.

На рис. 24 и 25 движения тележки в обоих случаях были прямолинейными.

Движение автомобиля и поезда на прямых участках пути, полет самолета после набора высоты можно рассматривать как прямолинейное движение.

## Прямолинейное равномерное движение

Тележка на рис. 24 совершает прямолинейное, но неравномерное движение. Стрелки часов совершают равномерное, но непрямолинейное движение. Следовательно, их движение не является прямолинейным. Но тележка на рис. 25 движется прямолинейно и равномерно. Поэтому ее движение является прямолинейным равномерным движением.



Если тело, движущееся прямолинейно, проходит за произвольные равные промежутки времени равные расстояния, то такое движение называется *прямолинейным равномерным движением*.

Приведем примеры простейшего механического движения – прямолинейного равномерного движения:

1. Автомобиль движется по прямой, совершенно ровной дороге, не меняя своей скорости.

2. Поезд движется по ровному прямолинейному участку пути, не меняя характера своего движения.

3. Корабль движется по тихой спокойной глади моря прямолинейно и равномерно.



**Опорные слова:** равномерное движение, прямолинейное движение, прямолинейное равномерное движение.



1. Объясните опыты, представленные на рис. 24 и 25.
2. Какое движение называется равномерным?
3. Какое движение называется прямолинейным? Приведите примеры.
4. Дайте определение прямолинейного равномерного движения.
5. На каком участке пути в школу вы совершаете прямолинейное равномерное движение?

## § 6. СКОРОСТЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

### Определение скорости

Мы знаем, что одно тело может двигаться быстрее или медленнее, чем другое. Например, велосипедист движется быстрее человека, автомобиль движется быстрее человека и велосипедиста, но медленнее поезда. Самолет движется быстрее поезда. Пусть все они движутся равномерно. Человек может проходить 4,5 км в час, велосипедист – 30 км, автомобиль – 90 км, поезд – 150 км, самолет – 900 км (рис. 26).



5 км/ч



90 км/ч



900 км/ч



30 км/ч



150 км/ч

Рис. 26. Тела движутся с различными скоростями.



**Величина, равная пути, пройденному за единицу времени, называется скоростью.**

Из курса физики 6 класса вы знаете, что путь  $s$ , пройденный телом, определяется временем  $t$ , за которое этот путь пройден, и скоростью  $v$ . В этом случае скорость выражается следующей формулой:

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1)$$



**Скорость тела при равномерном движении равна отношению пройденного пути к промежутку времени, за которое этот путь пройден.**

В приведенных выше примерах скорость человека 4,5 км/ч, велосипедиста – 30 км/ч, автомобиля – 90 км/ч, поезда – 150 км/ч, самолета – 100 км/ч.

Если движение является прямолинейным, то пройденный путь количественно равен перемещению. В этом случае формула для скорости будет выглядеть следующим образом:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \quad (2)$$

Перемещение – векторная величина, поэтому и скорость является векторной величиной, т.е. обладает направлением.

### Единицы скорости

В международной системе единиц, которая обозначается СИ (System Internationale – Международная система), единица пути – 1 метр (м), единица времени – 1 секунда (с).



**В СИ за основную единицу скорости принята скорость такого равномерного движения тела, при котором за 1 с тело проходит путь, равный 1 м, т.е. 1 м/с.**

Кроме основной единицы скорости, используются также производные единицы 1 км/ч, 1 км/мин, 1 км/с, 1 см/с.

При решении задач, как и в повседневной жизни, приходится переводить скорость, выраженную в км/ч в м/с, и обратно. Если скорость дана в м/с, ее значение умножают на 3,6 и получают значение в км/ч. Например, если велосипедист движется со скоростью 10 м/с, то его скорость в км/ч находят так:

$$v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 10 \cdot 3,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Если же скорость дана в км/ч, то ее значение делят на 3,6 или умножают на  $\frac{5}{18}$  и получают значение скорости, выраженное в м/с. Например, если автомобиль движется со скоростью 90 км/ч, то его скорость в м/с находят так:

$$v = 90 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 90 \cdot \frac{5}{18} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

### Измерение скорости

Скорость движущихся тел измеряется с помощью специальных приборов. Например, скорость автомобиля, корабля, самолета измеряется спидометром (от англ. *speed* – скорость и греч. *metreo* – измерять).

Вы видели спидометр на приборной доске автомобиля (рис. 27). Принцип его действия основан на измерении числа оборотов колес автомобиля за единицу времени. Например, если длина внешней окружности шины 2 м, то при каждом обороте колеса автомобиль проходит расстояние 2 м. Если колесо совершает 10 оборотов в секунду, то за это время автомобиль проходит 20 м. В этом случае спидометр автомобиля покажет скорость 20 м/с или 72 км/ч.

Существуют приборы, которые позволяют, находясь на земле, измерять скорость летящего самолета или, стоя на обочине дороги, измерять скорость приближающегося автомобиля. С помощью подобных приборов – радаров измеряют скорость автомобилей сотрудники дорожно-патрульной службы.



Рис. 27. Скорость автомобиля измеряется спидометром.

*Образец решения задачи*

Автомобиль «Нексия», двигаясь равномерно, прошел за 3 мин расстояние 5 км. Найдите его скорость в км/ч.

<i>Дано:</i>	<i>Формула:</i>	<i>Решение:</i>
$t = 3 \text{ мин} = 180 \text{ с};$ $s = 5 \text{ км} = 5000 \text{ м}.$	$v = \frac{s}{t}.$	$v = \frac{5000 \text{ м}}{180 \text{ с}} = \frac{250}{9} \cdot 3,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 100 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$
<i>Найти:</i> $v - ?$		<i>Ответ:</i> $v = 100 \text{ км/ч}.$



**Опорные понятия:** скорость равномерного движения, скорость прямолинейного равномерного движения, единицы скорости, спидометр.



1. Какая величина называется скоростью?
2. Какой вид имеет формула скорости для равномерного движения?
3. Какой вид имеет формула векторной скорости?
4. Какая единица принята в системе СИ за единицу скорости? Какие еще единицы скорости вы знаете?
5. Как измеряется скорость автомобиля?



1. Выразите в м/с скорость человека, велосипедиста, автомобиля, поезда и самолета, изображенных на рис. 26.
2. Выразите скорость в км/ч: 2 м/с, 5 м/с, 20 м/с, 50 м/с.
3. Длина эскалатора в метро 18 м. Найдите скорость эскалатора, если он поднимает вас вверх за 12 с.
4. Велосипедист, двигаясь равномерно, проехал за 15 мин расстояние 4,5 км. Найдите его скорость в м/с.
5. Автомобиль, двигаясь равномерно, проехал за 30 мин расстояние 40 км. Найдите скорость автомобиля.

## § 7. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

### Нахождение пути и времени из формулы скорости

Путь, пройденный телом при равномерном движении за определенный промежуток времени, можно найти, если известна скорость движения тела:

$$s = vt. \quad (1)$$



Для того, чтобы найти путь, пройденный при равномерном движении, нужно скорость тела умножить на время движения.

Например, если тело движется равномерно со скоростью  $v = 8$  м/с, то за время  $t = 10$  с оно пройдет путь  $s = vt = 8$  м/с  $\cdot$   $10$  с =  $80$  м.

Если известны путь, пройденный телом при равномерном движении, и скорость движения, то можно найти время движения:

$$t = \frac{s}{v}. \quad (2)$$



Для того, чтобы найти время движения тела, движущегося равномерно, нужно путь, пройденный за это время, разделить на его скорость.

Например, если тело движется равномерно со скоростью  $12$  м/с, то путь в  $60$  м оно пройдет за время  $t = \frac{s}{v} = \frac{60 \text{ м}}{12 \text{ с}} = 5$  с.

### График скорости

При равномерном движении в течение времени  $t$  скорость тела остается неизменной. Например, пусть тело, совершающее прямолинейное равномерное движение, имеет начальную скорость  $10$  м/с, тогда через  $5$ ,  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $25$  с скорость остается неизменной и равной  $10$  м/с. В этом случае график скорости будет иметь вид, изображенный на рис. 28, а.

В общем случае можно сказать, что при равномерном движении график скорости будет изображаться в виде прямоугольника со сторонами  $v$  и  $t$ . Площадь этого прямоугольника численно равна пройденному пути (рис. 28, б).

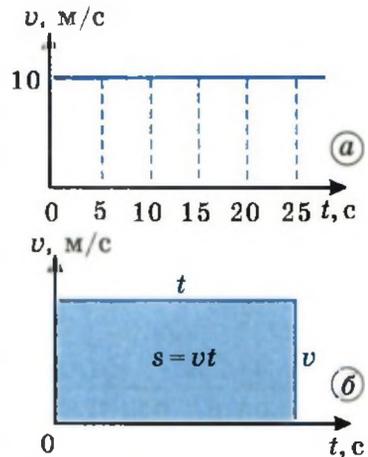


Рис. 28. График скорости.

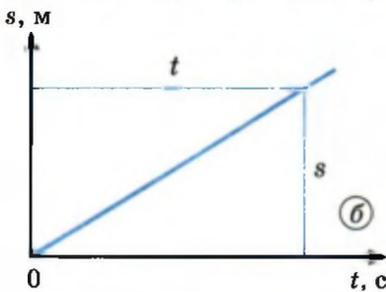
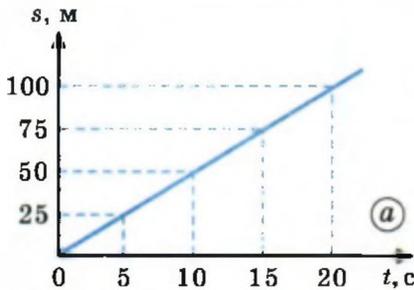


Рис. 29. График скорости.

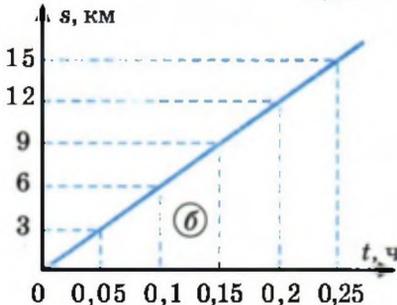
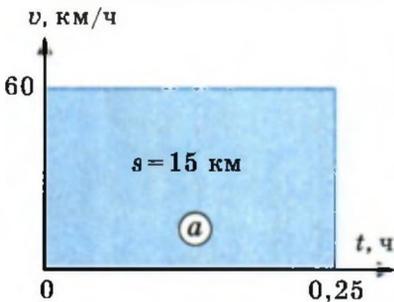


Рис. 30. Графики скорости (а) и пути (б) при движении автомобиля.

### График пути

Пусть тело движется со скоростью  $v = 5$  м/с. По формуле  $s = vt$  для пути, пройденного за время  $t$ , можно составить таблицу. Задавая  $t$  численные значения, находим соответствующие им значения пути  $s$ :

$t, с$	5	10	15	20
$s = vt, м$	25	50	75	100

Откладывая значения  $t$  и  $s$ , взятые из таблицы, на осях координат, получаем график пути (рис. 29, а). График пути для общего случая приведен на рис. 29, б.

### Образец решения задачи

Автомобиль движется равномерно со скоростью 60 км/ч. Начертите график его скорости и пути в течение 15 мин.

*Решение:* 15 мин = 0,25 ч. График скорости имеет вид прямоугольника со сторонами 60 км/ч и 0,25 ч (рис. 30, а). Площадь полученного прямоугольника:  $60 \cdot 0,25 = 15$ . Это значение количественно равно пути, пройденному автомобилем за 15 мин.

Учитывая, что в формуле  $s = vt$   $v = 60$  км/ч, составляем следующую таблицу:

$t, ч$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
$s, км$	3	6	9	12	15

На основе таблицы получаем график пути, изображенный на рис. 30, б.



**Опорные понятия:** путь, пройденный при равномерном движении, время движения тела, движущегося равномерно, график скорости, график пути.



1. Какой вид имеет формула пути для равномерного движения?
2. Как по формуле скорости равномерного движения определяется время движения?
3. Какой вид имеет график скорости?
4. Как с помощью таблицы составляется график пути?
5. Начертите примерный график скорости и пути для случая вашего равномерного движения от дома до школы?



1. Какое расстояние пройдет тело, движущееся равномерно со скоростью 3 м/с, за 20 с?
2. Какое расстояние проедет поезд, движущийся равномерно со скоростью 120 км/ч, за 15 мин?
3. За сколько минут тело, движущееся равномерно со скоростью 10 м/с, пройдет расстояние 6 км?
4. За сколько часов самолет, движущийся после набора высоты равномерно со скоростью 900 км/ч, пролетит расстояние 450 км?
5. Начертите графики скорости и пути для велосипедиста, движущегося равномерно со скоростью 18 км/ч.

## § 8. СКОРОСТЬ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

### Средняя скорость

При равномерном движении скорость прохождения расстояний  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ , соответствующих промежуткам времени  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ , постоянна, т.е. имеют место следующие равенства:

$$v = \frac{s_1}{t_1} = \frac{s_2}{t_2} = \frac{s_3}{t_3} = \dots = \frac{s_n}{t_n} = \text{const}, \quad (1)$$

где «const» – сокращение, обозначающее постоянство величины (от латинского *constantus* – неизменный, постоянный).

В окружающем нас пространстве тела совершают, в основном, неравномерное движение. Например, автомобиль прошел путь 35 км от од-

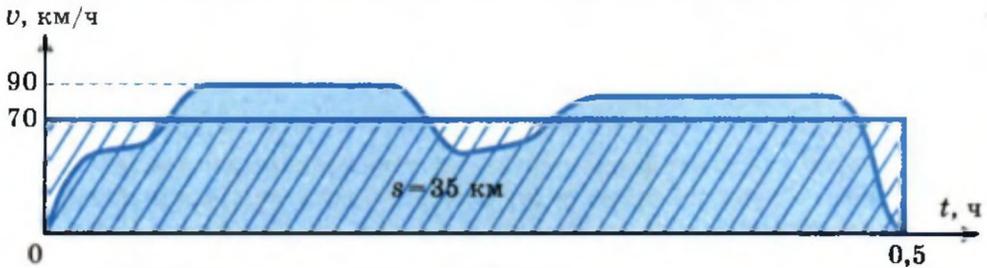


Рис. 31. График скорости автомобиля при неравномерном движении.

ного города до другого за 0,5 часа. Во время движения скорость его была различной. Хотя на определенных участках пути автомобиль двигался равномерно, все его движение в целом неравномерно (рис. 31).



**Если во время движения тела его скорость переменна, то такое движение называется неравномерным движением.**

Площадь голубой фигуры, изображенной на рис. 31, количественно равна значению пройденного пути  $s = 35$  км.

В приведенном выше примере можно говорить не о постоянной, а о средней скорости автомобиля. При этом средняя скорость автомобиля равна  $35 \text{ км} : 0,5 \text{ ч} = 70 \text{ км/ч}$ .



**Средняя скорость неравномерного движения тела равна отношению пройденного пути ко времени, за которое этот путь был пройден:**

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}. \quad (2)$$

График средней скорости, как и постоянной скорости, имеет вид горизонтально направленной прямой.

На основе формулы (2) путь, пройденный при неравномерном движении, выражается следующим образом:

$$s = v_{\text{ср}} t. \quad (3)$$

Произведение средней скорости автомобиля  $v_{\text{ср}} = 70 \text{ км/ч}$  на время движения  $t = 0,5 \text{ ч}$  количественно равно площади прямоугольника, изображенного на рис. 31. При этом площадь заштрихованной фигуры, об-

разованной графиком средней скорости, равна площади голубой фигуры, образованной графиком скорости неравномерного движения.

### Мгновенная скорость

Средняя скорость характеризует движение тела на всем пути в целом, но она не определяет скорости движения в произвольной точке пути при неравномерном движении. Нас же интересует, каково точное значение скорости в данной точке.



**Скорость тела в определенный момент времени или в некоторой точке траектории движения называется мгновенной скоростью. Мгновенная скорость показывает скорость тела в наблюдаемый момент времени.**

Рассмотрим неравномерное движение автобуса между двумя остановками. График скорости движения между двумя остановками можно изобразить так, как показано на рис. 32. Этот путь автобус проходит за 6 мин. Скорость в каждый момент этого промежутка времени и есть мгновенная скорость. Например, в момент времени 1 мин приблизительно мгновенная скорость равна 32 км/ч, в 3 мин – 40 км/ч, в 5 мин – 36 км/ч.

Чтобы приблизительно определить мгновенную скорость в некоторый момент времени  $t$ , находят длину пути  $\Delta s$  за промежуток времени от  $t$  до  $\Delta t$ , где  $\Delta t$  мало. Пусть, согласно рис. 32, автобус в течение промежутка времени  $\Delta t = 3$  с, начиная с момента времени  $t$ , пройдет путь  $\Delta s = 30$  м. Тогда приблизительно мгновенная скорость в точке А определяется следующим образом:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{30 \text{ м}}{3 \text{ с}} = 10 \cdot 3,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

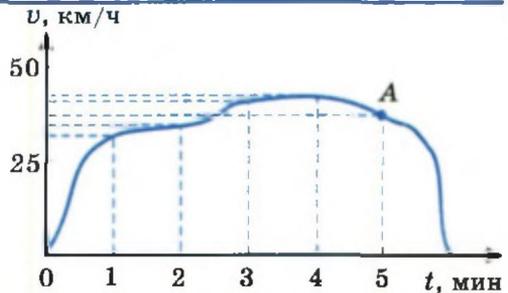


Рис. 32. График скорости автобуса.



**Опорные понятия:** неравномерное движение, средняя скорость, средняя скорость при неравномерном движении, мгновенная скорость.



1. Какое движение называется неравномерным?
2. Как определяется средняя скорость неравномерного движения?
3. Что называется мгновенной скоростью?
4. Проанализируйте график на рис. 32.



1. Тело, двигаясь неравномерно, прошло за 2 мин 60 м. Чему равна его средняя скорость (м/с)?
2. «Нексия», вышедшая из Ташкента в 7 ч 30 мин, проделала путь 270 км и прибыла в Фергану в 10 ч 30 мин. Найдите ее среднюю скорость.
3. Ученик в течение 2 с прошел 3 м. Найдите его скорость на этом участке пути. Какая это скорость: средняя или мгновенная?
4. Когда должен выйти из дома ученик, чтобы пройдя путь 600 м от его дома до школы, прийти в школу в 7 ч 50 мин, если его средняя скорость равна 1 м/с?

## § 9. УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОПЕРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ

### Понятие о равнопеременном движении

Простейший вид неравномерного движения – это равнопеременное движение. Примером равнопеременного движения могут служить движения шарика или тележки, скатывающихся по наклонной плоскости.

Рассмотрим движение тележки с капельницей по наклонной плоскости. Через каждые 5 с из капельницы равномерно капают капли. При отпуске тележки можно наблюдать, что расстояние между каплями на доске равномерно увеличивается (рис. 33). При этом:

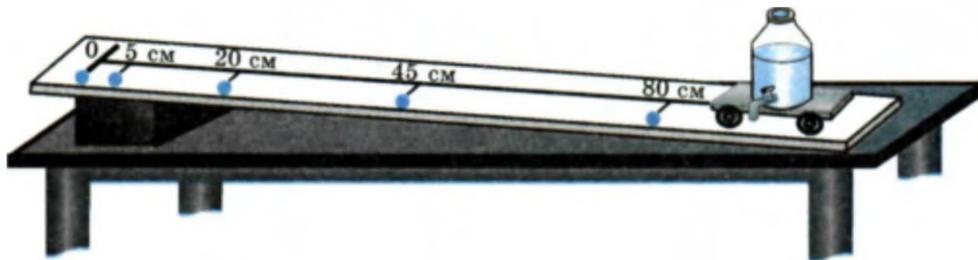


Рис. 33. Равнопеременное движение тележки по наклонной плоскости.

расстояние между 1-й и 2-й каплями – 5 см;

расстояние между 2-й и 3-й каплями – 20 см – 5 см = 15 см;

расстояние между 3-й и 4-й каплями – 45 см – 20 см = 25 см;

расстояние между 4-й и 5-й каплями – 80 см – 45 см = 35 см.

Следовательно, расстояние между каплями каждые 0,5 с увеличивается на 10 см. Отсюда следует, что скорость тележки за каждые 0,5 с увеличивается на  $10 \text{ см} : 0,5 \text{ с} = 20 \text{ см/с}$ .



**Движение, при котором за любые равные промежутки времени соответствующая скорость изменяется на равные величины, называется равнопеременным движением.**

Автомобиль, трогаящийся с места с равномерно увеличивающейся скоростью, совершает равнопеременное (равноускоренное) движение.

Тело, скорость которого равномерно уменьшается, также совершает равнопеременное (равнозамедленное) движение. Например, таким будет движение шарика вверх по наклонной плоскости. Если выключить мотор автомобиля, который движется с большой скоростью по ровной прямой дороге, то его движение будет равнопеременным, пока через некоторое время он не остановится. Поэтому, когда говорят о равнопеременном движении, имеют в виду, что скорость тела равномерно увеличивается или уменьшается.

### Ускорение, единица ускорения

Для характеристики равнопеременного движения введена величина, называемая **ускорением**.



**Изменение скорости тела за единицу времени называется ускорением.**

Формула ускорения имеет вид:

$$a = \frac{v - v_0}{t}, \quad (1)$$

где  $v_0$  – начальная скорость тела,  $v$  – скорость через время  $t$  после начала движения.



**Ускорение при равнопеременном движении определяется отношением величины изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло. Ускорение обозначается буквой  $a$ .**

Пользуясь формулой ускорения, можно найти единицу ускорения.



**В СИ за единицу ускорения принят  $\text{м/с}^2$ .  $1 \text{ м/с}^2$  – это изменение скорости движения тела на  $1 \text{ м/с}$  за одну секунду.**

Наряду с единицей ускорения  $1 \text{ м/с}^2$  используется также единица  $1 \text{ см/с}^2$ . При этом

$$1 \text{ м/с}^2 = 100 \text{ см/с}^2.$$

Формула ускорения справедлива и при равнозамедленном движении. Например, пусть тело, совершающее равнозамедленное движение, снизило за  $10 \text{ с}$  свою скорость с  $v_0 = 20 \text{ м/с}$  до  $v = 5 \text{ м/с}$ . Тогда ускорение будет следующим:

$$a = \frac{5 - 20}{10} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = -1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

При равноускоренном движении ускорение положительно ( $a > 0$ ), а при равнозамедленном – отрицательно ( $a < 0$ ).

Ускорение – векторная величина. В векторном виде оно выражается формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (2)$$

При прямолинейном равноускоренном движении направление ускорения совпадает с направлением движения тела, а при равнозамедленном движении – оно противоположно направлению движения.

#### Образец решения задачи

Автомобиль марки «Спарк», двигаясь равноускоренно, за  $5 \text{ с}$  увеличил скорость с  $36 \text{ км/ч}$  до  $90 \text{ км/ч}$ . Найдите его ускорение.

Дано:

$$\begin{aligned} t &= 5 \text{ с}; \\ v_0 &= 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с}; \\ v &= 90 \text{ км/ч} = 25 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Найти:  
 $a$  – ?

Формула:

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

Решение:

$$a = \frac{25 - 10}{5} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ:  $a = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .



**Опорные понятия:** равнопеременное движение, равноускоренное движение, равнозамедленное движение, ускорение.



1. Какое движение называется равнопеременным? Объясните на примерах.
2. Проанализируйте движение тележки по наклонной плоскости на рис. 33 и покажите, что оно является равнопеременным.
3. Что называется ускорением? Как выражается формула ускорения?
4. Какая единица принята за единицу ускорения в СИ?
5. Каков знак ускорения  $a$  при ускоренном движении? А при замедленном движении?
6. Как выражается ускорение в векторном виде?
7. Вы начали бежать и через некоторое время остановились. В каком случае вы двигались ускоренно, а в каком – замедленно?



1. Тело, двигаясь равноускоренно с нулевой начальной скоростью, достигло скорости 20 м/с за 8 с. С каким ускорением двигалось тело?
2. Велосипедист, начав равноускоренное движение из состояния покоя, за 10 с достиг скорости 18 км/ч. Затем затормозил и, двигаясь равнозамедленно, остановился через 5 с. Найдите ускорение велосипедиста при равноускоренном и равнозамедленном движениях.
3. Автомобиль «Капитива» при равноускоренном движении увеличил в течение 25 с свою скорость с 45 до 90 км/ч. Найдите ускорение автомобиля.
4. За какое время тело, движущееся с ускорением  $0,3 \text{ м/с}^2$  из состояния покоя, достигнет скорости 9 м/с?
5. Самолет коснулся колесами земли на скорости 360 км/ч. Через какое время он остановится, двигаясь с ускорением  $-2,0 \text{ м/с}^2$ ?

## § 10. СКОРОСТЬ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

### Скорость равнопеременного движения и ее график

Если при равнопеременном движении тела известны его начальная скорость и ускорение, то можно определить его скорость в произволь-

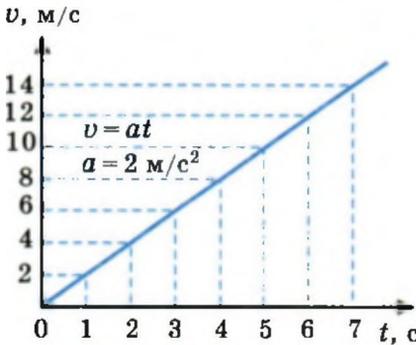
ный момент времени его движения. Из формулы  $a = \frac{v - v_0}{t}$  находим его скорость  $v$  в произвольный момент времени  $t$ :

$$v = v_0 + at. \quad (1)$$

При равнопеременном движении с начальной скоростью  $v_0 = 0$  формула скорости имеет вид:

$$v = at. \quad (2)$$

Построим график скорости тела, движущегося с ускорением  $a = 2 \text{ м/с}^2$  без начальной скорости. Для этого в формуле (2) принимаем  $a = 2 \text{ м/с}^2$ , а затем, задавая значения  $t$ , получаем соответствующие им значения  $v$ . Результаты записываем в таблицу:



$t, \text{с}$	1	2	3	4	5	6	7
$v, \text{м/с}$	2	4	6	8	10	12	14

Рис. 34. График скорости для равноускоренного движения ( $v_0 = 0$ ).

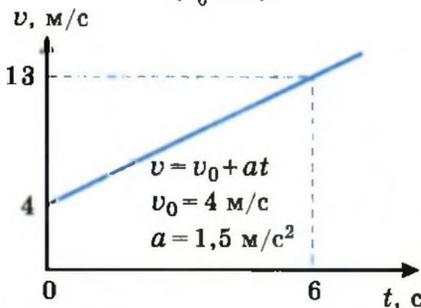


Рис. 35. График скорости для равноускоренного движения ( $v_0 > 0$ ).

Откладывая значения  $t$  и  $v$ , взятые из таблицы, на осях координат, получаем график скорости равноускоренного движения для случая  $v_0 = 0$  (рис. 34).

Для равнопеременного движения график скорости имеет прямолинейный вид. Поэтому на графике достаточно изобразить лишь два значения времени и соответствующие им скорости.

Пусть тело равноускоренно движется с начальной скоростью  $v_0 = 4 \text{ м/с}$  и ускорением  $a = 1,5 \text{ м/с}^2$ . В этом случае из формулы (1) можно вычислить при  $t = 0$  скорость  $v = 4 \text{ м/с}$ , а при  $t = 6 \text{ с}$  —  $v = 13 \text{ м/с}$ . Откладывая эти значения на осях координат, получаем график, изображенный на рис. 35. Это — график скорости тела, совершающего с начальной скоростью равноускоренное движение.

Рассмотрим теперь график скорости при равнозамедленном движении тела,

т.е. при  $a < 0$ . Пусть тело равнозамедленно движется с начальной скоростью  $v_0 = 15$  м/с и ускорением  $a = -1$  м/с<sup>2</sup>. Из формулы (1) при  $t = 0$  находим  $v = 15$  м/с, при  $t = 10$  с —  $v = 5$  м/с. Откладывая полученные значения на осях координат, образуем график скорости для равнозамедленного движения (рис. 36).

При равнозамедленном движении тело в конце концов останавливается. Это также видно на рис. 36. Действительно, в формуле (1) при  $t = 15$  с  $v = 0$ , т.е. тело прекращает движение.

Обычно тело, начиная движение из состояния покоя, в начале движется с ускорением и достигает некоторой скорости, а затем совершает замедленное движение и останавливается. Например, пусть велосипедист, который трогается с места равноускоренно, за 10 с увеличивает скорость до 5 м/с. Он движется с этой скоростью в течение 40 с, а затем тормозит, совершая равнозамедленное движение, и останавливается. График скорости такого движения велосипедиста показан на рис. 37.

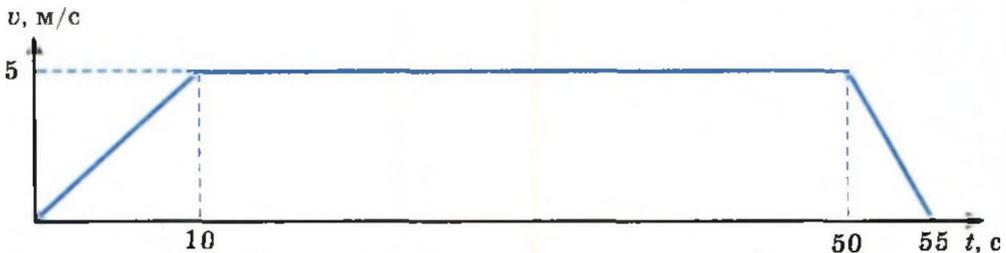


Рис. 37. График скорости движения велосипедиста.

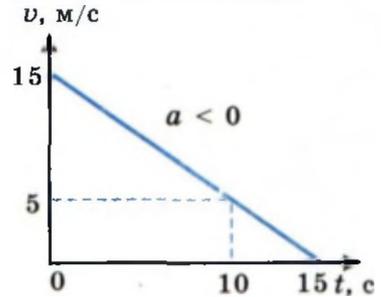


Рис. 36. График скорости для равнозамедленного движения.

### Средняя скорость равнопеременного движения

Тело, совершающее равнопеременное движение, имеет среднюю скорость

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_0 + v}{2}, \quad (3)$$

где  $v_0$  — начальная скорость,  $v$  — скорость в произвольный момент времени  $t$ .

Например, среднюю скорость тела, график скорости которого приведен на рис. 35, через 6 с движения можно вычислить следующим образом:

$$v_{\text{ср}} = \frac{4 + 13}{2} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 8,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставляя в формуле (3) вместо скорости  $v$  ее выражение  $v = v_0 + at$ , получаем следующую формулу средней скорости:

$$v_{\text{ср}} = v_0 + \frac{at}{2}. \quad (4)$$

Например, по значениям на графике (рис. 35)  $v_0 = 4 \text{ м/с}$  и  $a = 1,5 \text{ м/с}^2$  можно найти среднюю скорость тела при  $t = 6 \text{ с}$ :

$$v_{\text{ср}} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}} + \frac{1,5 \cdot 6}{2} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 8,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Из формул (3) и (4) можно вывести выражения средней скорости для равнопеременного движения при начальной скорости  $v_0 = 0$ :

$$v_{\text{ср}} = \frac{v}{2}, \quad (5)$$

$$v_{\text{ср}} = \frac{at}{2}. \quad (6)$$

*Образец решения задачи*

Какую скорость разовьет автомобиль марки «Матиз», движущийся равноускоренно с начальной скоростью 18 км/ч и ускорением 1,0 м/с<sup>2</sup>, через 10 с движения? Найдите среднюю скорость автомобиля.

*Дано:*

$$\begin{aligned} v_0 &= 18 \text{ км/ч} = 5 \text{ м/с}; \\ a &= 1 \text{ м/с}^2; \\ t &= 10 \text{ с}. \end{aligned}$$

*Формула:*

$$\begin{aligned} v &= v_0 + at; \\ v_{\text{ср}} &= v_0 + \frac{at}{2}. \end{aligned}$$

*Решение:*

$$\begin{aligned} v &= (5 + 1 \cdot 10) \text{ м/с} = \\ &= 15 \text{ м/с} = 54 \text{ км/ч}; \\ v_{\text{ср}} &= (5 + (1 \cdot 10)/2) \text{ м/с} = \\ &= 10 \text{ м/с} = 36 \text{ км/ч}. \end{aligned}$$

*Найти:*

$$v - ? \quad v_{\text{ср}} - ?$$

*Ответ:*  $v = 54 \text{ км/ч}; v_{\text{ср}} = 36 \text{ км/ч}.$



**Опорные понятия:** скорость при равнопеременном движении, средняя скорость равнопеременного движения.



1. Какой вид имеет формула скорости равнопеременного движения?
2. Постройте график скорости равноускоренного движения тела.
3. Какой вид имеет график скорости равнозамедленного движения тела?

- Проанализируйте график скорости, приведенный на рис. 37. Какое движение совершает велосипедист, тронувшись с места? А перед остановкой?
- Как выражается средняя скорость равнопеременного движения тела?



- Какую скорость приобретет тело, трогаящееся с места с ускорением  $0,2 \text{ м/с}^2$ , через 1 мин после начала движения?
- Какую скорость приобретет тело, движущееся с ускорением  $0,4 \text{ м/с}^2$  и с начальной скоростью  $3 \text{ м/с}$ , через 30 с после начала движения?
- Автомобиль «Нексия», движущийся со скоростью  $60 \text{ км/ч}$ , после выключения мотора совершает равнозамедленное движение с ускорением  $-0,5 \text{ м/с}^2$ . Какой будет скорость автомобиля через 20 с? Какой была его скорость в течение этих 20 с?
- Через некоторое время тело, движущееся с ускорением  $0,4 \text{ м/с}^2$ , достигло скорости  $9 \text{ м/с}$ . Какой была скорость тела за 10 с до этого времени?

## § 11. ПУТЬ, ПРОЙДЕННЫЙ ПРИ РАВНОПЕРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ

### Формула пути

Пусть тело, совершая равноускоренное движение из состояния покоя с ускорением  $a$ , достигло за время  $t$  скорости  $v$ . Путь, пройденный за это время, выражается так:

$$s = v_{\text{ср}} t. \quad (1)$$

Так как  $v_{\text{ср}} = at/2$ , то получаем формулу для пути, пройденного при равноускоренном движении:

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

Вы знаете, что график скорости тела, равномерно движущегося с начальной скоростью  $v_0 = 0$ , имеет вид прямой, направленной по наклону (рис. 38).

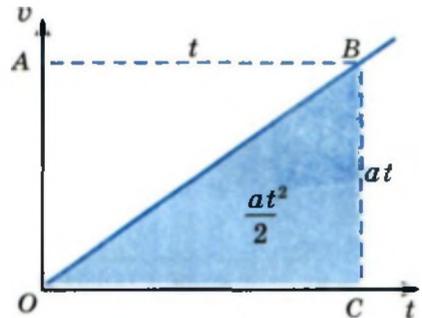


Рис. 38. Путь при равноускоренном движении с  $v_0 = 0$ .

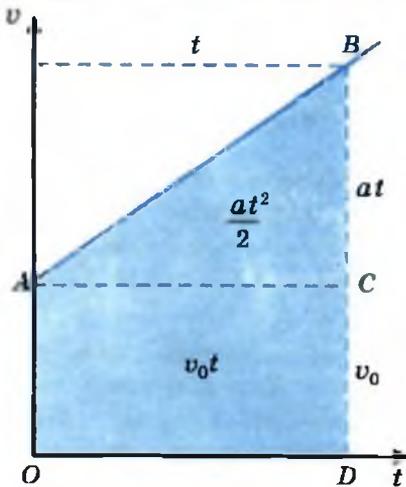


Рис. 39. График пути при равноускоренном движении с  $v_0 > 0$ .

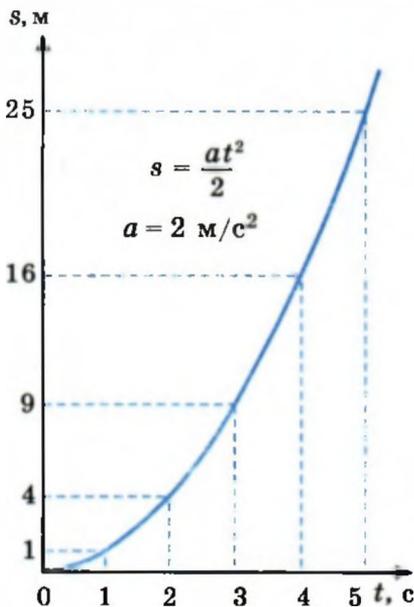


Рис. 40. График пути при равноускоренном движении с  $v_0 = 0$ .

Определим площадь треугольника  $OBC$ , изображенного на рис. 38. Поскольку прямоугольник  $OABC$  на рисунке имеет стороны  $at$  и  $t$ , то его площадь равна  $at \cdot t = at^2$ . Площадь треугольника  $OBC$  составляет половину четырехугольника  $OABC$ , т.е.  $at^2/2$ , что выражает пройденный телом путь  $s$ .

При равноускоренном движении тела с начальной скоростью  $v_0$  путь  $s$ , пройденный им за время  $t$ , равен численному значению площади фигуры  $OABD$ , изображенной на рис. 39. Эта площадь складывается из площади  $v_0t$  прямоугольника  $OACD$  и площади  $at^2/2$  треугольника  $ABC$ .

Следовательно, путь, пройденный телом при равнопеременном движении, дается формулой:

$$s = v_0t + \frac{at^2}{2}. \quad (3)$$

### График пути

Пусть тело из состояния покоя ( $v_0 = 0$ ) движется равноускоренно с ускорением  $a = 2 \text{ м/с}^2$ . Для того, чтобы построить график такого движения, составим таблицу, придавая  $t$  последовательные значения и находя соответствующие значения пути  $s$ :

$t, \text{ с}$	0	1	2	3	4	5
$s, \text{ м}$	0	1	4	9	16	25

Откладывая на осях координат соответствующие значения  $t$  и  $s$ , строим график (рис. 40).

Для равноускоренного движения с ненулевой начальной скоростью график стро-

ится аналогично. График пути будет по-прежнему криволинейным, при этом с возрастанием времени пройденный путь быстро увеличивается.

### Образец решения задачи

Велосипедист, движущийся по ровной прямой дороге со скоростью 10 м/с, начал равнозамедленное движение с ускорением  $-0,2 \text{ м/с}^2$ . Какой путь пройдет велосипедист за 40 с? Через какое время он остановится?

Дано:

$$\begin{aligned} v_0 &= 10 \text{ м/с}; \\ a &= -0,2 \text{ м/с}^2; \\ t &= 40 \text{ с}; \\ v &= 0. \end{aligned}$$

Найти:

$$s - ? \quad t_0 - ?$$

Формула:

$$\begin{aligned} s &= v_0 t + \frac{at^2}{2}; \\ v &= v_0 + at_0; \\ v_0 + at_0 &= 0; \\ t_0 &= -\frac{v_0}{a}. \end{aligned}$$

Решение:

$$\begin{aligned} s &= (10 \cdot 40 + \frac{-0,2 \cdot 40^2}{2}) \text{ м} = 240 \text{ м}; \\ t_0 &= -\frac{10}{-0,2} \text{ с} = 50 \text{ с}. \end{aligned}$$

Ответ:  $s = 240 \text{ м}; t_0 = 50 \text{ с}.$



**Опорные понятия:** путь, пройденный при равнопеременном движении, график пути при равнопеременном движении.



1. Какой будет формула пути для равномерного движения с  $v_0 = 0$ ?
2. Как определяется путь, пройденный телом при  $v_0 = 0$ , по графику скорости, приведенному на рис. 38?
3. Как определяется путь, пройденный телом при  $v_0 > 0$ , по графику скорости, приведенному на рис. 39?
4. Объясните, как строится график пути, показанный на рис. 40.



1. Какой путь пройдет тело, движущееся равноускоренно из состояния покоя с ускорением  $0,3 \text{ м/с}^2$ , за промежуток времени 10 с?
2. Какой путь пройдет автомобиль, движущийся равноускоренно с начальной скоростью 30 км/ч и ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ , за промежуток времени 1 мин?
3. Тело движется равноускоренно из состояния покоя с ускорением  $1 \text{ м/с}^2$ . Постройте график пути тела.
4. Автомобиль, начальная скорость которого 36 км/ч, совершает равноускоренное движение с ускорением  $4 \text{ м/с}^2$ . Постройте график пути автомобиля.

## § 12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

(Лабораторная работа 1)

**Цель работы:** измерение пути и времени движения шарика, скатывающегося по наклонному желобу, для определения ускорения тела при равноускоренном движении.

**Необходимые принадлежности:** металлический желоб, стальной шарик, штатив, металлический цилиндр, мерная лента, секундомер.



Рис. 41. Установка для определения ускорения при равноускоренном движении.

### Порядок выполнения работы

1. Установите наклонный желоб на штатив, как показано на рис. 41, внизу желоба поместите металлический цилиндр.

2. Определите секундомером время, за которое шарик, пущенный вниз по наклонной плоскости, достигает металлического цилиндра внизу желоба.

3. Повторите опыт три раза. Измеряйте каждый раз промежутки времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и занесите результаты в таблицу.

4. Измерьте с помощью мерной ленты путь, пройденный шариком, и занесите результаты в таблицу.

5. Из формулы для пути при равноускоренном движении  $s = at^2/2$  следует формула для ускорения  $a = 2s/t^2$ . Подставляя в нее значения  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и измеренное значение пути  $s$ , вычислите значения ускорения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и занесите результаты в таблицу.

6. Вычислите среднее ускорение по формуле  $a = (a_1 + a_2 + a_3)/3$  и занесите результат в таблицу. Это число выражает значение ускорения шарика, скатывающегося по желобу.

7. Повторите опыт при трех различных положениях желоба.
8. Проанализируйте результаты и сделайте выводы.

Таблица

№	$s$ , м	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$a_1$ , м/с <sup>2</sup>	$a_2$ , м/с <sup>2</sup>	$a_3$ , м/с <sup>2</sup>	$a$ , м/с <sup>2</sup>
<i>Образец</i>	1,63	6	5	7	0,09	0,13	0,07	0,1
1								
2								
3								



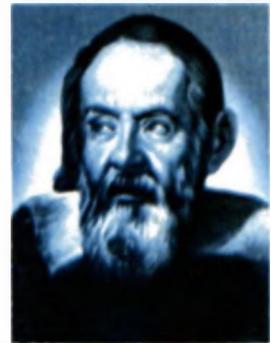
1. Какие приспособления необходимы для этой работы? Для чего предназначено каждое из них?
2. По какой причине при измерении времени результаты каждый раз оказываются различными?
3. По какой формуле вычисляется ускорение?
4. Почему увеличивается ускорение при увеличении наклона желоба?

### § 13. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Свободное падение тела – это пример прямолинейного равнопеременного движения. Такое движение тел изучал в конце XVI в. итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642).

Галилей определил, что свободное падение является равноускоренным движением. Бросая тела со знаменитой башни в г. Пиза и, зная высоту башни, он определил время и ускорение свободного падения (рис. 42). Согласно расчетам, ускорение свободного падения тела равнялось  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Если выпустить из рук камень, он свободно упадет на землю. Но если выпустить из рук клочок бумаги, он не сразу упадет на землю. Свободному падению бумаги мешает сопротивление воздуха.



Галилео Галилей



**Падение тела в вакууме только под действием силы притяжения Земли называется свободным падением.**

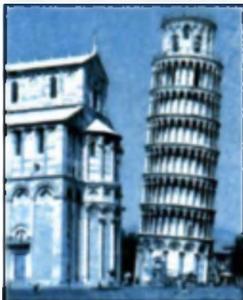


Рис. 42. Пизанская башня.

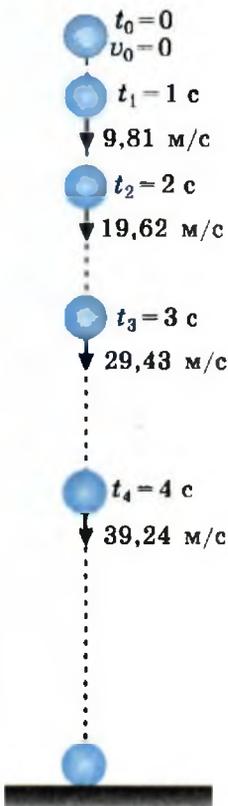


Рис. 43. Движение свободно падающего тела.

При падении тяжелого камня, металлического шарика сопротивление воздуха можно не учитывать. Их движение можно рассматривать как свободное падение.

Скорость тела при свободном падении возрастает в равные промежутки времени на одну и ту же величину. Например, шарик, брошенный с высоты, движется равноускоренно, и его скорость возрастает каждую секунду на 9,81 м/с (рис. 43).



**Ускорение свободно падающего тела – величина постоянная. Эта величина называется ускорением свободного падения и обозначается буквой  $g$ .**

При этом:

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Ускорение свободного падения приближенно можно считать равным 9,8 м/с<sup>2</sup>, а в некоторых случаях даже 10 м/с<sup>2</sup>.

Ускорение свободного падения – векторная величина, всегда направленная вертикально вниз.

Все формулы, относящиеся к прямолинейному равнопеременному движению, можно применять для свободного падения. Необходимо только заменить ускорение  $a$  на  $g$  и путь  $s$  на высоту  $h$ . Таким образом можно получить следующие формулы для свободного падения:

1. Скорость свободно падающего тела в момент времени  $t$ :

$$v = v_0 + gt; \quad (1) \text{ при } v_0 = 0 \quad v = gt. \quad (2)$$

2. Средняя скорость свободно падающего тела:

$$v_{\text{ср}} = v_0 + \frac{gt}{2}; \quad (3) \text{ при } v_0 = 0 \quad v_{\text{ср}} = \frac{gt}{2}. \quad (4)$$

3. Высота, с которой свободно падает тело:

$$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}; \quad (5) \text{ при } v_0 = 0 \quad h = \frac{gt^2}{2}. \quad (6)$$

**Образец решения задачи**

Тело, сброшенное с высоты, упало на землю через 5 с. С какой высоты сброшено тело? Какова его скорость падения? Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**Дано:****Формула:****Решение:**

$$\begin{aligned} t &= 5 \text{ с;} \\ g &= 10 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

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

$$h = \frac{10 \cdot 5^2}{2} \text{ м} = 125 \text{ м};$$

**Найти:**

$$v = gt.$$

$$v = (10 \cdot 5) \text{ м/с} = 50 \text{ м/с}.$$

$$h - ? \quad v - ?$$

$$\text{Ответ: } h = 125 \text{ м}; v = 50 \text{ м/с};$$



**Опорные понятия:** свободное падение, ускорение свободного падения.



1. Что называется свободным падением?
2. Обоснуйте постоянство ускорения свободного падения.
3. Как обозначается ускорение свободного падения и чему оно равно?
4. Запишите основные формулы, относящиеся к свободному падению.



1. Тело сброшено с некоторой высоты. Какой будет скорость свободно падающего тела через 6 с? Какое расстояние проделало тело за это время? Здесь и далее  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Тело, сброшенное вниз с некоторой высоты, совершает свободное падение. Через какое время его скорость достигнет 40 м/с? С какой высоты сброшено тело?
3. Тело сброшено с некоторой высоты со скоростью 15 м/с вертикально вниз. Какой скорости оно достигнет через 3 с? Какое расстояние оно проделало за это время?

## § 14. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

Тело, брошенное вертикально вверх, совершает равнозамедленное движение. При этом его ускорение  $g = -g$ . В таком случае, используя формулу  $v = v_0 + gt$ , можно найти скорость подброшенного вверх тела в произвольный момент времени  $t$ :

$$v = v_0 - gt.$$

(1)

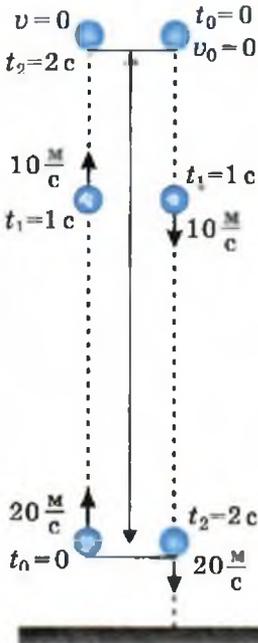


Рис. 44. Движение тела, брошенного вертикально вверх.

А из формулы (5) можно определить высоту подъема этого тела в произвольный момент времени  $t$ :

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

Опыт показывает, что тело, брошенное вертикально вверх, поднимается вверх и падает на землю за одно и то же время. Допустим, например, что тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью  $v_0 = 20$  м/с (рис. 44). Принимая  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>, выполняем следующие вычисления.

Когда тело достигает максимальной высоты, его скорость равна  $v = 0$ . В таком случае из формулы (1) можно найти время, за которое оно поднялось на максимальную высоту:

$$t = \frac{v_0}{g} = \frac{20}{10} \text{ с} = 2 \text{ с}.$$

Принимая в формуле (2)  $v_0 = 0$ , вычисляем, на какую высоту от точки, из которой оно было подброшено, поднялось тело:

$$h = (20 \cdot 2 - \frac{10 \cdot 2^2}{2}) \text{ м} = 20 \text{ м}.$$

Достигнув максимальной высоты, тело начнет падать вниз с ускорением  $g$ . Вычисляем, какое расстояние проходит падающее вниз тело за 2 с:

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{10 \cdot 2^2}{2} \text{ м} = 20 \text{ м}.$$

Следовательно, тело возвращается в точку, из которой оно было подброшено, через 2 с.

Теперь вычислим, какой скорости достигнет тело при падении вниз через 2 с:

$$v = gt = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 2 \text{ с} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Тело было подброшено вверх именно с такой скоростью.



Тело, брошенное вертикально вверх, поднимается вверх и падает на землю за одно и то же время. Тело падает на землю с той же скоростью, с которой оно было брошено вертикально вверх.

**Образец решения задачи**

Чему равна скорость тела, брошенного вертикально вверх со скоростью 40 м/с, через 3 с? На какую высоту оно при этом поднимется? Принять  $g$  равным 10 м/с<sup>2</sup>.

**Дано:**

$$\begin{aligned} v_0 &= 40 \text{ м/с;} \\ t &= 3 \text{ с;} \\ g &= 10 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

**Найти:**

$$v - ? \quad h - ?$$

**Формула:**

$$\begin{aligned} v &= v_0 - gt; \\ h &= v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \end{aligned}$$

**Решение:**

$$v = (40 - 10 \cdot 3) \text{ м/с} = 10 \text{ м/с};$$

$$h = (40 \cdot 3 - \frac{10 \cdot 3^2}{2}) \text{ м} = 75 \text{ м}.$$

$$\text{Ответ: } v = 10 \text{ м/с}; \quad h = 75 \text{ м}.$$



1. Как выражается скорость тела, брошенного вертикально вверх, через время  $t$ ?
2. Как определяется высота, на которую поднимается тело, брошенное вертикально вверх, за время  $t$ ?
3. Объясните на рис. 44 движение тела, брошенного вертикально вверх.
4. Какой будет скорость яблока, подброшенного вертикально вверх со скоростью 3 м/с, в момент, когда вы его поймаете?



1. Тело подброшено вертикально вверх со скоростью 25 м/с. Какой будет скорость тела через 2 с? На какую высоту поднимется тело за это время? Здесь и далее принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Тело подброшено вертикально вверх со скоростью 30 м/с. На какую высоту поднимется тело и через какое время оно упадет в точку подбрасывания?
3. Тело подброшено вертикально вверх со скоростью 40 м/с. Какой будет скорость тела через 5 с? На какую высоту оно поднимется за это время?

**ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ II**

- ◆ В настоящей главе изучены прямолинейное равномерное движение, неравномерное движение и прямолинейное равнопеременное движение.
- ◆ При прямолинейном равномерном движении тело проходит одинаковые расстояния вдоль прямой линии за равные промежутки времени.
- ◆ Скорость тела при равномерном движении равна:  $v = \frac{s}{t}$ .

- ◆ Средняя скорость тела, совершающего неравномерное движение, равна:  $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$ .
- ◆ При равнопеременном движении расстояние, пройденное телом за любые равные промежутки времени, или его скорость увеличиваются или уменьшаются на равные величины.
- ◆ Ускорение тела при равнопеременном движении равно:  $a = \frac{v - v_0}{t}$ .
- ◆ Скорость тела, совершающего равнопеременное движение, в произвольный момент времени  $t$  равна:  $v = v_0 + at$ .
- ◆ Средняя скорость тела при равнопеременном движении равна:  $v_{\text{ср}} = \frac{v_0 + v}{2}$ .
- ◆ Путь тела при равнопеременном движении равен:  $s = v_0t + \frac{at^2}{2}$ .
- ◆ Тело, брошенное с высоты на землю с ускорением  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , совершает равноускоренное движение.
- ◆ Скорость свободно падающего тела для каждого момента времени равна:  $v = v_0 + gt$ .
- ◆ Высота падения свободно падающего тела равна:  $h = v_0t + \frac{gt^2}{2}$ .

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ II

1. Велосипедист, двигаясь равномерно, за 10 мин проехал 3 км. Определите скорость велосипедиста в м/с и км/ч.
2. Какой путь пройдет автомобиль, движущийся со скоростью 80 км/ч, за 45 мин?
3. За сколько минут ученик, идущий со скоростью 2,5 км/ч, доберется до школы, если расстояние от его дома до школы равно 500 м?
4. Скорость мотоцикла – 72 км/ч, а скорость встречного ветра – 5 м/с. Какую скорость покажет спидометр мотоцикла? А при попутном ветре?

5. Два поезда движутся навстречу друг к другу со скоростью 90 км/ч и 72 км/ч. Пассажир второго поезда определил, что первый поезд проехал мимо него в течение 6 с. Пассажир первого поезда заметил, что второй поезд проехал мимо него в течение 8 с. Найдите длину каждого поезда.
6. Скорость лодки относительно воды в три раза больше скорости течения реки. Во сколько раз больше времени потребуется лодке, чтобы проплыть расстояние между двумя пунктами против течения?
7. Автомобиль проехал в первые 10 с 150 м, в следующие 20 с – 500 м и в последние 5 с – 50 м. Определите среднюю скорость автомобиля для каждого отрезка пути и всего пути в км/ч.
8. Поезд за 10 с после начала движения развил скорость 36 км/ч. За какое время при таком равноускоренном движении средняя скорость поезда составит 72 км/ч?
9. Шарик, скатывающийся из состояния покоя по наклонной плоскости, в 1-ю секунду прошел 8 см. Какой путь пройдет шарик за 3 с?
10. Какой путь пройдет автомобиль за 4 с, если он начал движение из состояния покоя с ускорением 5 м/с<sup>2</sup>? Какую скорость он разовьет за это время?
11. Из графика скорости при  $v_0 = 0$ , показанного на рис. 34, вычислите путь, пройденный телом за  $t = 5$  с.
12. Из графика скорости при  $v_0 > 0$ , приведенного на рис. 35, вычислите путь, пройденный телом за  $t = 9$  с.
13. Тело, брошенное с определенной высоты, свободно падает. За какое время оно достигнет скорости 80 м/с? В данной и следующих задачах принять  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.
14. Тело сброшено с определенной высоты со скоростью 5 м/с. Какой скорости достигнет тело через 5 с?
15. Груз, сброшенный с вертолета, находящегося в воздухе в состоянии покоя, упал на землю за 12 с. С какой высоты сброшен груз и какова его скорость? Сопротивление воздуха не учитывать.



## Глава III. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

В предыдущей главе вы изучили движения, траектории которых были прямолинейными. Любое движение тела, траектория которого не является прямолинейной, называется криволинейным. Самое простое криволинейное движение – вращательное движение.

### § 15. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

#### Понятие о вращательном равномерном движении

Движение часовой стрелки, равномерное движение колеса велосипеда или автомобиля можно назвать вращательным равномерным движением.



Если материальная точка, двигаясь по окружности, проходит за произвольные равные промежутки времени равные дуги, то такое движение называется вращательным равномерным движением.

Говоря о вращательном движении материальной точки, имеют в виду вращательное движение некоторой точки тела. Кончик часовой стрелки, точку велосипедного или автомобильного колеса можно рассматривать как материальные точки. При этом вращение колеса рассматривается не по отношению к земле, а по отношению к велосипеду или корпусу автомобиля.

#### Линейная и угловая скорости

При вращательном движении тело за определенный промежуток времени  $\Delta t$  проходит вдоль дуги длиной  $\Delta s$ .



**Величина, измеряемая длиной дуги, пройденной материальной точкой, совершающей вращательное движение, за единицу времени, называется линейной скоростью.**

То есть:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (1)$$

При вращательном равномерном движении точки, расположенные на различных расстояниях от оси вращения тела, проходят в течение некоторого промежутка времени дуги различной длины. Из рис. 45 можно видеть, что за промежуток времени  $\Delta t$  точка  $A$  пройдет дугу  $\Delta s$ , точка  $A_1$  – дугу  $\Delta s_1$ , точка  $A_2$  – дугу  $\Delta s_2$ . Так как длина этих дуг различна, то различной будет и линейная скорость указанных точек.

Пусть тело равномерно движется по окружности радиуса  $R$  (рис. 46). Если оно за некоторое время  $\Delta t$  переместится из точки  $A$  в точку  $B$ , то радиус окружности, проведенный в точку  $A$ , повернется на некоторый угол  $\Delta\phi$ . Этот угол называется **углом поворота**. Независимо от расстояния вращающейся точки от оси вращения угол поворота остается неизменным.

Угол поворота измеряется в радианах (рад) или в градусах ( $^\circ$ ).



**Угол, опирающийся на дугу, длина которой равна радиусу, равен одному радиану.**

То есть при:  $\Delta s = R \Delta\phi = 1$  рад (рис. 47).

Один радиан составляет приблизительно  $57^\circ$  (градусов), т.е.:  $1 \text{ рад} \approx 57^\circ$ . Если радиус  $R$  на рис. 47 повернуть на  $2$  рад, то  $\Delta\phi = 114^\circ$ , на  $3^\circ$  –  $\Delta\phi \approx 172^\circ$ . При поворачивании радиуса  $R$  на половину окружности, т.е. на  $180^\circ$ ,  $\Delta\phi$  составляет  $3,14$  рад.

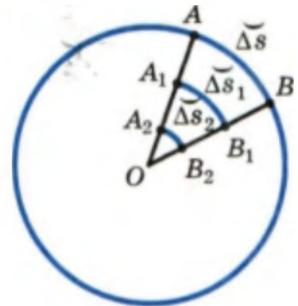


Рис. 45. Путь, пройденный различными точками.

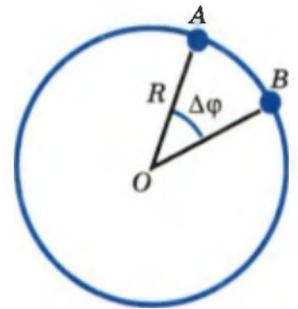


Рис. 46. Образование угла поворота.

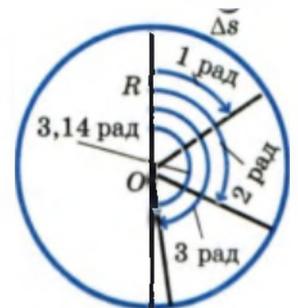


Рис. 47. Получение угла, равного 1 рад.

Радийанная мера угла поворота равна:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\overset{\sim}{s}}{R}. \quad (2)$$

При вращательном движении вместо линейной скорости чаще используют угловую скорость  $\omega$ . При этом:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (3)$$



**Угловой скоростью вращательного движения называется угол поворота тела за единицу времени.**

Угловая скорость – скалярная величина, за ее единицу принят рад/с. Во всех точках вращающегося тела величина угловой скорости  $\omega$  всегда постоянна.

*Образец решения задачи*

Для подъема воды из Анхора установлен чигирь. На расстоянии 1,5 м от его оси вращения по окружности закреплены ведра. Найдите угол поворота ведер, их линейную и угловую скорости, если чигирь совершает полный оборот вокруг своей оси за 24 с.

<p><b>Дано:</b>  <math>R = 1,5 \text{ м};</math>  <math>\Delta t = 24 \text{ с};</math></p> <hr/> <p><b>Найти:</b>  <math>\Delta\varphi - ?</math> <math>v - ?</math>  <math>\omega - ?</math></p>	<p><b>Формула:</b>  <math>\Delta\varphi = 2\pi;</math> из <math>\Delta\varphi = \frac{\Delta\overset{\sim}{s}}{R}</math>                  следует <math>\Delta\overset{\sim}{s} = \Delta\varphi R;</math></p> <p><math>v = \frac{\Delta\overset{\sim}{s}}{\Delta t};</math>    <math>\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.</math></p>	<p><b>Решение:</b>  <math>\Delta\varphi = 2 \cdot 3,14 \text{ рад} = 6,28 \text{ рад};</math>  <math>\Delta\overset{\sim}{s} = 6,28 \cdot 1,5 \text{ м} = 9,42 \text{ м};</math>  <math>v = \frac{9,42 \text{ м}}{24 \text{ с}} = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}};</math>  <math>\omega = \frac{6,28 \text{ рад}}{24 \text{ с}} = 0,26 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.</math></p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Ответ:**  $\Delta\varphi = 6,28 \text{ рад}; v = 0,4 \text{ м/с}; \omega \approx 0,26 \text{ рад/с}.$



**Опорные понятия:** вращательное равномерное движение, линейная скорость, угол поворота, радиан, градус, угловая скорость.



1. Какое движение называется вращательным равномерным движением?
2. Можно ли считать вращательным движение колеса велосипеда или автомобиля по отношению к земле?
3. Как определяется линейная скорость?

4. Почему при вращательном движении вместо линейной скорости чаще используют угловую скорость?
5. Чему равен 1 рад?
6. Как выражается угловая скорость? Дайте ее определение.
7. Чему будет равен угол поворота, если радиус  $R$  на рис. 47 совершит один полный оборот вдоль окружности? А если два оборота?



1. Колесо поворачивается на угол в 1 рад за 0,1 с. Найдите линейную скорость точек, расположенных на расстоянии 5, 10 и 15 см от оси вращения. С какой угловой скоростью поворачивается колесо?
2. Точка велосипедного колеса, наиболее удаленная от оси вращения, за 0,02 с прошла дугу длиной 20 см. Найдите скорость велосипедиста.
3. Кончик минутной стрелки часов, длина которой равна 30 мм, прошел за 10 мин дугу длиной 30 мм. Найдите линейную скорость, угол поворота и угловую скорость кончика минутной стрелки.
4. Найдите значения длины дуг, на которые опираются углы в 1, 2, 3 и 3,14 рад, если радиус окружности равен 1 м.
5. Кабины «чертова колеса» установлены на расстоянии 20 м от оси вращения. Кабина совершает один полный оборот вокруг оси вращения за 10 мин. Найдите линейную и угловую скорости кабины.

## § 16. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ВЕЛИЧИНАМИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

### Соотношения между линейной и угловой скоростями

В образце решения задачи, приведенном в конце § 15, была выведена формула пути при вращательном равномерном движении тела:

$$\Delta s = \Delta \varphi R.$$

Подставляя эту формулу в формулу для линейной скорости, получаем выражение:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta \varphi R}{\Delta t} = \omega R.$$

Следовательно, при вращательном равномерном движении тела соотношение между линейной и угловой скоростями описывается в виде:

$$v = \omega R. \quad (1)$$

### Соотношения между периодом вращения, частотой, линейной и угловой скоростями

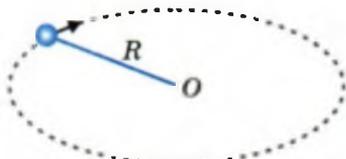
Вращательное равномерное движение можно характеризовать еще двумя величинами – периодом и частотой вращения.



**Промежуток времени, в течение которого тело совершает один оборот по окружности, называется периодом вращения.**

Период вращения обозначается буквой  $T$ . За его единицу принимается секунда (с).

Если тело за время  $\Delta t$  совершает  $n$  оборотов, то в этом случае его период вращения  $T$  определяется следующим образом:



$$T = \frac{\Delta t}{n}. \quad (2)$$

Если, например, шарик, закрепленный на нити, как показано на рис. 48, за 8 с совершает 20 оборотов, то период его вращения находится так:

Рис. 48. Движение шарика, закрепленного на нити.

$$T = \frac{8}{20} \text{ с} = 0,4 \text{ с}.$$



**Число полных оборотов, которые тело совершает за единицу времени, называется частотой вращения.**

Частота вращения обозначается буквой  $\nu$ . За единицу частоты принята  $1/\text{с}$ .

Если тело за время  $\Delta t$  совершает  $n$  оборотов, то частота вращения его  $\nu$  определяется по формуле:

$$\nu = \frac{n}{\Delta t}. \quad (3)$$

Если тело, закрепленное на нити, совершает за 8 с 20 оборотов, то его частота вращения находится так:

$$\nu = \frac{20}{8} \frac{1}{\text{с}} = 2,5 \frac{1}{\text{с}}.$$

Соотношение между периодом вращения  $T$  и частотой вращения  $\nu$ :

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Соотношение между периодом вращения  $T$  и линейной скоростью  $v$ :

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad \text{или} \quad v = \frac{2\pi R}{T}. \quad (5)$$

Соотношение между периодом вращения  $T$  и угловой скоростью  $\omega$ :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (6)$$

Соотношение между частотой вращения  $\nu$  и линейной скоростью  $v$ :

$$v = \frac{v}{2\pi R} \quad \text{или} \quad v = 2\pi\nu R. \quad (7)$$

Соотношение между частотой вращения  $\nu$  и угловой скоростью  $\omega$ :

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi\nu. \quad (8)$$

### Образец решения задачи

Автомобиль «Нексия» движется равномерно со скоростью 90 км/ч. Найдите период вращения, частоту вращения и угловую скорость вращения колеса автомобиля, радиус которого равен 40 см.

**Дано:**  
 $v = 90 \text{ км/ч} = 25 \text{ м/с};$   
 $R = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}.$

**Формула:**

$$T = \frac{2\pi R}{v};$$

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

$$\omega = 2\pi\nu.$$

**Решение:**

$$T = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4}{25} \text{ с} \approx 0,1 \text{ с}.$$

$$\nu = \frac{1}{0,1 \text{ с}} = 10 \frac{1}{\text{с}}.$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 62,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

**Ответ:**  $T = 0,1 \text{ с}; \nu = 10 \text{ 1/с}; \omega = 62,8 \text{ рад/с}.$



**Опорные понятия:** путь, пройденный телом при вращательном равномерном движении, период вращения, частота вращения.



1. Как выражается путь, пройденный телом при вращательном равномерном движении?
2. Как выражается соотношение между линейной и угловой скоростями?
3. Что называется периодом вращения?
4. Какая физическая величина называется частотой вращения?

5. Как выражается соотношение между периодом вращения, линейной и угловой скоростями?
6. Как выражается соотношение между частотой вращения, линейной и угловой скоростями?



1. Ведро чигиря совершает за 1 мин 2 оборота. Найдите линейную и угловую скорости вращения ведра, закрепленного на расстоянии 1 м от оси вращения чигиря.
2. Диск прядильной машины совершает за 1 мин 1 200 оборотов. Найдите период вращения, частоту вращения и угловую скорость диска.
3. Велосипедист движется равномерно со скоростью 10 м/с. Найдите период вращения, частоту вращения и угловую скорость колеса велосипеда, если его радиус равен 30 см.
4. Частота вращения шарика, закрепленного на нити длиной 25 см, равна 4 1/с. Найдите период вращения шарика, его линейную и угловую скорости.
5. Определите линейную и угловую скорости тела, находящегося на земном экваторе. Радиус Земли приблизительно равен 6 400 км.

## § 17. ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ

### Направление скорости при вращательном движении

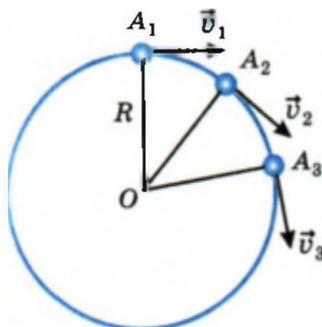


Рис. 49. Направления скоростей при вращательном равномерном движении.

Пусть шарик радиуса  $R$  совершает равномерное движение по окружности. Пусть во время движения он за промежуток времени  $\Delta t$  перемещается из точки  $A_1$  в точку  $A_2$ , еще за такой же промежуток времени – из точки  $A_2$  в точку  $A_3$  (рис. 49).

Так как шарик движется равномерно, его скорости в точках  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  одинаковы, но имеют различные направления. Как видно из рис. 49, скорости перпендикулярны радиусу окружности, т.е. направлены по касательным к дуге окружности.

В том, что скорости точек при вращательном движении направлены по касательным, можно убедиться, наблюдая за направлением искр при работе точильного колеса (рис. 50).

### Ускорение при вращательном движении

Вектор ускорения тела, совершающего прямолинейное движение, выражается формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} \quad (1)$$

При равномерном движении шарика по окружности, изображенном на рис. 49, разность векторов скоростей  $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$  или  $\vec{v}_a - \vec{v}_b$  за промежутки времени  $\Delta t$  отлична от нуля. Следовательно, вращательному движению присуще ускорение.

Из формулы (1) ускорение для шарика, движущегося за время  $\Delta t$  из точки  $A_1$  в точку  $A_2$ , можно выразить следующим образом:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} \quad (2)$$

Формула ускорения для тела, равномерно двигающегося со скоростью  $v$  по окружности с радиусом  $R$ , выражается в виде:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

### Направление ускорения при вращательном движении

При перемещении шарика, совершающего вращательное равномерное движение, из точки  $A_1$  в точку  $A_2$ , разность векторов скоростей равна  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ . Вычитание вектора  $\vec{v}_1$  из вектора  $\vec{v}_2$ , а также направление разностного вектора  $\Delta \vec{v}$  показаны на рис. 51.

При вращательном движении направление ускорения  $\vec{a}$  и направление разностного вектора  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$  одинаковы, в чем можно убедиться также из формулы (2).

Приведем конец вектора  $\Delta \vec{v}$  из рис. 51 к точке  $A_2$ . Чем ближе точка  $A_2$  к точке  $A_1$ , тем ближе будет направление вектора  $\Delta \vec{v}$  к центру окружности. При максимальном приближении точки  $A_2$  к точке  $A_1$  вектор  $\Delta \vec{v}$ , а следова-



Рис. 50. Направление искр по касательной при работе точильного колеса.

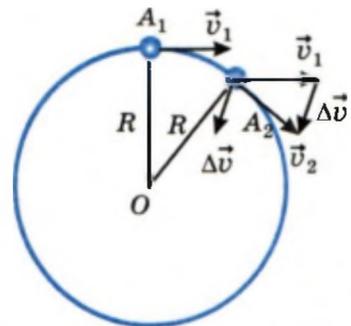


Рис. 51. Разность векторов скоростей при вращательном движении.

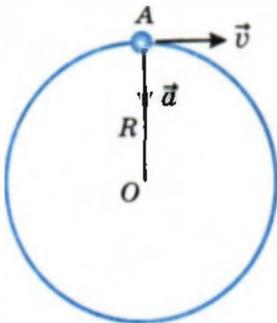


Рис. 52. Направление центростремительного ускорения.

тельно, ускорение  $\vec{a}$  будут направлены к центру окружности вдоль радиуса  $R$  (рис. 52). Поэтому ускорение тела, совершающего вращательное равномерное движение, называется **центростремительным ускорением**.

*Образец решения задачи*

Велосипедист движется по окружности с радиусом 25 м со скоростью 10 м/с. Найдите центростремительное ускорение велосипеда.

*Дано:*  
 $R = 25 \text{ м};$   
 $v = 10 \text{ м/с}.$

*Найти:*  
 $a - ?$

*Формула:*

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

*Решение:*

$$a = \frac{10^2 \text{ м}}{25 \text{ с}^2} = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

*Ответ:*  $a = 4 \text{ м/с}^2.$



**Опорные понятия:** ускорение при вращательном движении, центростремительное ускорение.



1. Почему при вращательном равномерном движении скорости точек, расположенных по окружности на одинаковом расстоянии от оси вращения, одинаковы, но имеют различные направления?
2. Почему при прямолинейном равномерном движении ускорение тела равно нулю, а при вращательном равномерном движении отлично от нуля?
3. Как выражается ускорение при вращательном равномерном движении?
4. Объясните вычитание векторов скоростей на рис. 51.
5. Почему ускорение, возникающее при вращательном равномерном движении, называется центростремительным?



1. Шарик, закрепленный на нити длиной 25 см, вращается с линейной скоростью 5 м/с. Найдите центростремительное ускорение шарика.
2. Автомобиль движется со скоростью 90 км/ч. Найдите центростремительное ускорение точки колеса, наиболее удаленной от его центра. Радиус колеса равен 35 см.
3. Диск прядильного станка имеет диаметр 12 см и вращается со скоростью 1 200 об/мин. Найдите центростремительное ускорение точки диска, наиболее удаленной от его центра.

4. Велосипедист движется со скоростью 12 м/с. Центробежное ускорение точки колеса, наиболее удаленной от его оси, равно  $250 \text{ м/с}^2$ . Найдите радиус колеса велосипеда.
5. Радиус лопасти вентилятора 15 см, частота вращения - 20 1/с. Найдите период вращения лопасти, ее линейную и угловую скорости и центробежное ускорение точки на вершине лопасти.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ III

- ◆ Тело, совершающее вращательное равномерное движение, проходит за произвольные равные промежутки времени равные дуги.
- ◆ Линейная скорость тела, совершающего вращательное равномерное движение:  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ .
- ◆ Угловая скорость тела, совершающего вращательное равномерное движение:  $\omega = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ .
- ◆ Соотношение между линейной и угловой скоростями при вращательном равномерном движении:  $v = \omega R$ .
- ◆ Период вращения – это время, в течение которого тело совершает один полный оборот по окружности:  $T = \frac{\Delta t}{n}$ .
- ◆ Частота вращения – число оборотов тела за единицу времени:  $\nu = \frac{n}{\Delta t}$ .
- ◆ Формулы периода вращения:  $T = \frac{1}{\nu}$ ,  $T = \frac{2\pi R}{v}$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ .
- ◆ Формулы частоты вращения:  $\nu = \frac{1}{T}$ ,  $\nu = \frac{v}{2\pi R}$ ,  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ .
- ◆ Телу, равномерно движущемуся по окружности с радиусом  $R$  с линейной скоростью  $v$ , присуще ускорение:  $a = \frac{v^2}{R}$ . Так как ускорение направлено к центру окружности, такое ускорение называется центробежным.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ III

1. Шарик, закрепленный на нити длиной 50 см, совершает 36 оборотов в 1 мин. Найдите частоту и период вращения шарика, его линейную и угловую скорости.
2. Вершина лопасти вентилятора с радиусом, равным 20 см, вращается с линейной скоростью. Найдите период и частоту вращения, а также линейную и угловую скорости лопасти.
3. Определите линейную скорость и частоту вращения Луны вокруг Земли. Период вращения Луны вокруг Земли – 27 суток 7 ч 43 мин. Расстояние от центра Земли до Луны принять равным  $3,9 \cdot 10^8$  м.
4. Определите линейную скорость и частоту вращения Земли вокруг Солнца. Период вращения Земли вокруг Солнца – 365 суток 5 ч 48 мин 46 с. Расстояние от Земли до Солнца принять равным  $1,5 \cdot 10^{11}$  м.
5. Найдите частоту вращения тела, находящегося на экваторе, относительно центра Земли и его центростремительное ускорение. Радиус Земли принять равным 6400 км.
6. Чигирь, диаметр барабана которого равен 12 см, поднимает груз со скоростью 1 м/с. Найдите частоту вращения барабана чигиря.
7. Поезд преодолевает поворот с радиусом кривизны 1000 м со скоростью 54 км/ч. Найдите центростремительное ускорение поезда.
8. Каким будет центростремительное ускорение точек колеса автомобиля, касающихся земли, если частота вращения колес автомобиля, движущегося со скоростью 90 км/ч, равна 10 об/с?
9. Велосипед, диаметр колеса которого равен 80 см, движется со скоростью 18 км/ч. Найдите линейную скорость, период и частоту вращения, угловую скорость и центростремительное ускорение точек колеса, касающихся земли.
10. Диск точильной машины диаметром 30 см совершает 1800 оборотов в 1 мин. С какой скоростью вылетают искры с поверхности диска во время заточки?

# ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Изучая в кинематике движение тел, мы не принимали во внимание силы, которые действуют на тело. Мы получили сведения о поступательном и вращательном движении, знаем, что такое равномерное и равнопеременное движение. Теперь приступим к изучению движения тел под действием силы.

Изучением движения тел под действием силы занимается раздел механики, который называется динамикой. Слово «динамика» от греч. *dinamikos* означает *относящийся к силе, силовой*.

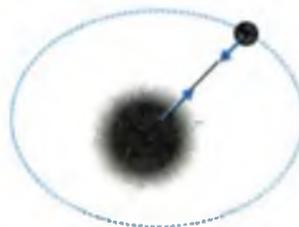
---

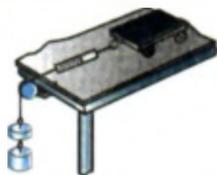
## Глава IV. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ



---

## Глава V. ВНЕШНИЕ СИЛЫ И ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ





## Глава IV. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

Мы познакомимся с тремя основными законами динамики – законами движения. Законы движения открыл в 1687 г. великий английский ученый **Исаак Ньютон**, и в его честь эти законы названы законами Ньютона. Законы Ньютона появились в результате изучения многовековой практической деятельности человечества.

### § 18. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА – ЗАКОН ИНЕРЦИИ

#### Инерция тела

Первые утверждения относительно инерции тела были сделаны в начале XVII в. Галилео Галилеем. Мы постоянно встречаемся с проявлениями инерции тел. Например, если автобус внезапно тронется с места, все люди, находящиеся в нем, отклонятся назад, потому что они стремятся сохранить состояние покоя.

Если движущийся автобус внезапно затормозит, все люди, находящиеся в нем, подадутся вперед, потому что в этом случае они стремятся сохранить состояние движения.



**Стремление тел сохранять свое состояние (покоя или движения) – есть проявление инерции. Все тела обладают инерцией.**

Благодаря инерции нельзя мгновенно увеличить или уменьшить скорость тела. Для изменения состояния тела нужно некоторое время.

#### Первый закон Ньютона

Ньютон, основываясь на выводах исследований своих предшественников, а также собственных наблюдений и экспериментов, следующим образом сформулировал закон инерции:



Каждое тело, на которое не действуют другие тела, сохраняет свое состояние покоя или прямолинейного равномерного движения.

Этот закон называется *первым законом Ньютона*.

Содержание первого закона Ньютона можно объяснить следующим образом.

1. Тело, находящееся в состоянии покоя, сохраняет это состояние до тех пор, пока на него не действуют другие тела. Например, мяч, спокойно лежащий на площадке, будет оставаться неподвижным до тех пор, пока нога игрока не приведет его в движение (рис. 53). Если ударить по мячу, его состояние покоя сменится движением.

Вагон не тронется с места, пока на него не окажет воздействие другое тело – тепловоз.

2. Если на тело, равномерно движущееся по прямой, не окажут воздействия другие тела, оно будет сохранять свое движение. Например, мяч, летящий после удара, имеет некоторую начальную скорость  $v_0$ . Мяч должен был сохранять по отношению к земле прямолинейное движение с постоянной скоростью  $v_0$ . Однако под действием силы притяжения Земли и сопротивления воздуха он будет двигаться по криволинейной траектории (рис. 54).

Если во время движения автомобиля со скоростью  $v_0$  внезапно заглохнет мотор, автомобиль должен был бы продолжить свое движение с постоянной скоростью  $v_0$ . Но в результате трения колес автомобиля о землю, сопротивления воздуха и ряда других причин его скорость будет уменьшаться и, проехав некоторое расстояние, автомобиль остановится.



Исаак Ньютон



Рис. 53. Если не ударить по мячу, он останется неподвижным.



Рис. 54. Движение мяча после удара.



**Опорные понятия:** инерция тела, первый закон Ньютона.



1. Кем впервые были высказаны мысли об инерции тела?
2. Что вы знаете об инерции тел? Приведите примеры.
3. Сформулируйте первый закон Ньютона и объясните его суть.
4. Почему камень, брошенный с определенной скоростью в горизонтальном направлении, не совершает прямолинейное равномерное движение?

## § 19. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. СИЛА

### Взаимодействие тел



Рис. 55. Взаимодействие магнита и железа.

Тело, находящееся в состоянии покоя, начинает движение в результате взаимодействия с другими телами, а движущееся тело меняет характер своего движения.

**Опыт.** Поместите кусочек железа на пробку и положите на воду, налитую в плоский сосуд. Если вы приблизите к железу магнит, пробка вместе с ним придет в движение (рис. 55). Причина движения – взаимодействие железа с магнитом.

Подкиньте мячик, он начнет двигаться с начальной скоростью  $v_0$ . Вы сами привели мячик в движение. Скорость подброшенного вверх мяча станет уменьшаться под действием силы притяжения Земли, пока не обратится в нуль, и мячик начнет свободное падение.

Если вы сдвинете книгу, лежащую на столе, она придет в движение. Но из-за трения поверхностей книги и стола это движение прекратится.

### Сила

Взаимодействие тел может быть различным по величине. Например, взрослый человек сможет толкнуть ядро гораздо дальше мальчика. Далеко не каждый выжмет штангу в 100 кг. Штангист сделает это спокойно.

Для характеристики взаимодействия тел вводится понятие физической величины – силы.



**Физическая величина, характеризующая меру механического воздействия на тело других тел, называется силой.**

Механическое воздействие происходит в результате непосредственного контакта тел или под действием поля. Сдвинуть лежащий на земле груз, толкнуть или поднять его, растянуть и сжать пружину, скрутить нить можно только при непосредственном контакте.

На рис. 55 на железо действует магнитное поле. Притяжение тел к Земле – результат действия гравитационного поля. Сила обозначается буквой  $F$ .

В СИ за единицу силы принят ньютон (1Н). На практике часто используют миллиньютон (мН) и килоньютон (кН):

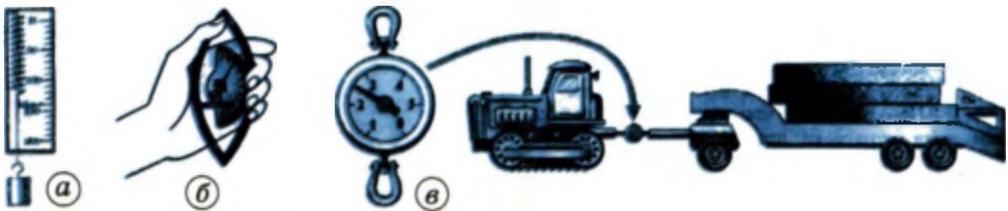
$$1 \text{ Н} = 1000 \text{ мН}; \quad 1 \text{ кН} = 1000 \text{ Н}.$$

Сила – векторная величина, кроме численного значения, она характеризуется еще направлением и точкой приложения (см. рис. 14).



**Сила измеряется динамометром.**

Динамометры бывают различными в зависимости от цели использования. Некоторые из них приведены на рис. 56.



**Рис. 56.** Динамометры: простейший (а), кистевой (б) и предназначенный для измерения больших сил (в).

### Сложение сил

Если на тело действуют несколько сил, то их сумма определяется следующим образом. Пусть, например, на тележку действуют две противоположно направленные силы  $F_1 = 3 \text{ Н}$  и  $F_2 = 5 \text{ Н}$  (рис. 57, а). Так

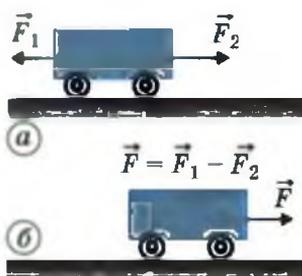


Рис. 57.

Противоположно направленные силы (а) и их сумма (б).

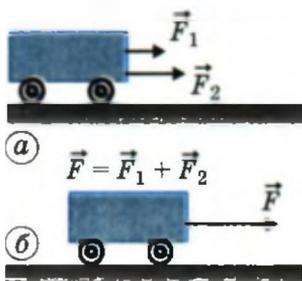


Рис. 58. Силы, направленные в одну сторону (а), и их сумма (б).

как  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  равна не 8 Н, как можно было подумать, а 2 Н, то под действием силы  $|\vec{F}| = 2$  Н тележка будет двигаться вправо (рис. 57, б).

Если силы, действующие на тележку, направлены в одну сторону (рис. 58, а), то в этом случае значения обеих сил складываются непосредственно. Результирующая сила будет равна 8 Н, и тележка будет двигаться вправо (рис. 58, б).

Если вдоль прямой линии действующая не две, а большее число сил, то результирующая сила находится путем сложения или вычитания их значений в зависимости от направления каждой силы.



**Опорные понятия:** взаимодействие тел, сила, единица силы – ньютон.



1. Что вы понимаете под взаимодействием тел?
2. Что называется силой и в каких единицах она измеряется?
3. Объясните устройство и работу динамометра.
4. Как складываются прямолинейно направленные силы?

## § 20. МАССА ТЕЛА

### Инертность тел

**Опыт.** Две одинаковые тележки, прикрепленные к упругой пластине, поместим на стол так, как показано на рис. 59. Если освободить нить, стягивающую пластинку, она распрямится и толкнет обе тележки в разные стороны. При этом ускорения обеих тележек будут численно равны, то есть:

$$a_1 = a_2.$$

Положим теперь на одну из тележек груз и повторим тот же опыт (рис. 60). В этом случае ускорение тележки без груза будет больше, то есть:

$$a_1 > a_2.$$

Чем большим будет груз, тем меньшим будет ускорение тележки. Иными словами, чем больше будет груз, тем труднее будет вывести тележку из состояния покоя. С увеличением груза способность тележки сохранять состояние покоя или движения будет усиливаться.

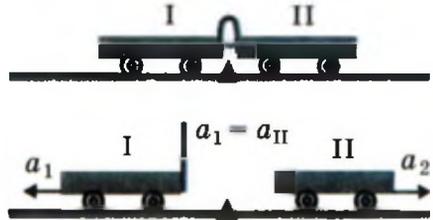


Рис. 59. Движение тележек с одинаковой инертностью.

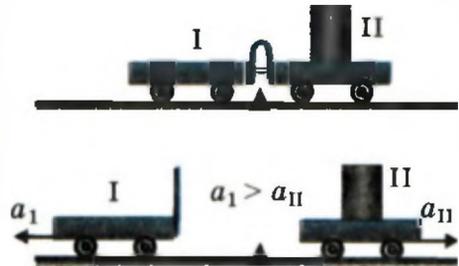


Рис. 60. Движение тележек с различной инертностью.



**Свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения в отсутствие внешних сил называется его инертностью.**

При воздействии на тело силой оно проявляет большую или меньшую инертность. Действительно, поднимать гантель легче, чем штангу, так как инертность гантели меньше инертности штанги. Если толкнуть игрушечный автомобиль, он покатится. Но настоящую машину сдвинуть с места трудно, потому что она обладает большой инертностью. Инертность поезда больше инертности любой автомашины. Поэтому резко увеличить скорость поезда, выведя его из состояния покоя, или изменить его скорость, если он движется, очень трудно. Чтобы остановить поезд, набравший большую скорость, потребуются большие сила и время.



**Чем больше инертность тела, тем труднее вывести его из состояния покоя или изменить характер его движения.**

## Масса

Все тела обладают инертностью. Из приведенных выше примеров видно, что инертность тел может быть различной. Для сравнения инертности тел введена специальная физическая величина.



**Физическая величина, характеризующая инертность тела, называется *массой* и обозначается буквой *m*. Слово «масса» – латинского происхождения и означает «ком», «кусок».**

Чем больше инертность тела, тем больше его масса. В опыте, показанном на рис. 60, масса тележки, на которую поместили груз, стала большей, чем масса первой тележки. Точно так же масса штанги больше массы гантели, масса настоящей машины больше массы игрушечной модели, масса поезда во много раз больше массы любой автомашины.

В СИ за единицу массы принят один килограмм (кг).



**Масса 1 дм<sup>3</sup> (1 литр) дистиллированной воды при 4°С равна 1 кг.**

За эталон килограмма принят изготовленный из сплава платины и иридия цилиндр массой 1 кг. Он хранится во французском городе Севр в Международном бюро мер и весов.

Вы знаете, что масса тела измеряется также в граммах (г), центнерах (ц), тоннах (т).

Масса тел измеряется с помощью рычажных и других видов весов.

## Масса системы тел

Масса – скалярная величина. Чтобы определить общую массу нескольких тел, надо найти массу каждого тела и сложить их. Например, массы двух рассматриваемых тел равны  $m_1$  и  $m_2$  соответственно. Тогда система, образованная из этих двух тел, имеет массу  $m = m_1 + m_2$ .

Если система состоит из  $n$  тел с массами  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$  соответственно, то масса системы равна сумме масс составляющих ее тел:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n.$$

Согласно этому свойству, масса служит мерой количества вещества.



**Опорные понятия:** инертность тел, масса, масса системы тел.



1. Что такое инертность тела? Поясните на примерах.
2. Что такое масса и как она обозначается?
3. Что принято за единицу массы в СИ? В каких еще единицах измеряется масса?
4. Как подсчитывается общая масса системы тел?
5. Какова ваша инертность относительно инертности ваших родителей? А ваша масса?

## § 21. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

### Зависимость между ускорением и силой

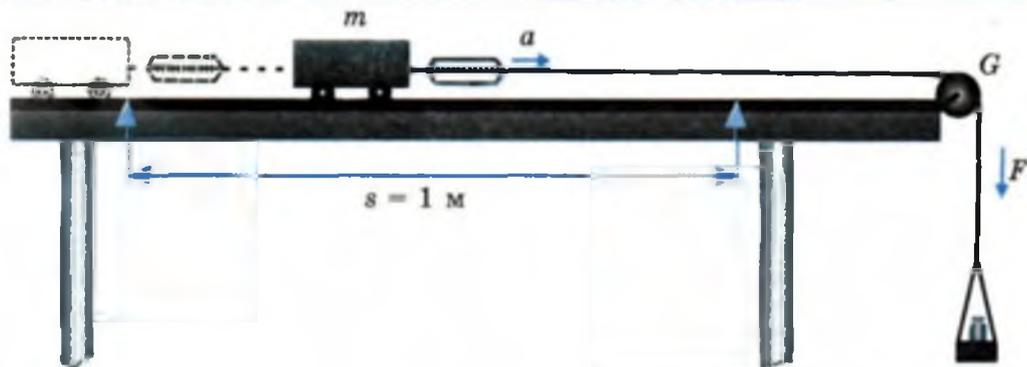
Вы знаете, что путь, пройденный телом, совершающим прямолинейное и равнопеременное движение с ускорением  $a$  за время  $t$ , имеет вид  $s = at^2/2$ . Из этой формулы можно найти ускорение тела:

$$a = \frac{2s}{t^2}. \quad (1)$$

Если на тело подействует сила, его скорость изменится, следовательно, появится ускорение. Для выяснения зависимости между силой, действующей на тело, и ускорением, которое тело приобретает под действием силы, проведем следующий опыт.

**Опыт 1.** Пусть по горизонтальному столу движется тележка массой  $m$ . К тележке прикреплен динамометр  $D$ , второй конец которого прикреплен к нити, перекинутой через катушку  $G$ . К концу нити, свисающему с катушки, прикреплена чаша. Величину силы  $F$ , действующей на тележку, можно измерить динамометром (рис. 61).

1. Положим на чашу такой груз, чтобы динамометр, прикрепленный к тележке, показал действующую на нее силу, например,  $F_1 = 0,1$  Н. Предположим, что если отпустить тележку, находящуюся на расстоянии  $s = 1$  м,



**Рис. 61.** Ускорение, приобретенное тележкой массой  $m$  при воздействии на нее силы  $F$ .

она пройдет этот путь за время  $t_1 = 4,5$  с. В таком случае, по формуле (1), тележка приобретет ускорение  $a_1 = 0,1$  м/с<sup>2</sup>.

2. Увеличив массу груза, увеличим силу  $F_2 = 0,2$  Н. Можно убедиться в том, что в этом случае путь  $s = 1$  м тележка пройдет за время  $t_2 = 3$  с. Тогда ускорение тележки будет равно  $a_2 = 0,2$  м/с<sup>2</sup>.

3. При  $F_3 = 0,3$  Н тележка пройдет путь  $s = 1$  м за время  $t_3 = 2,5$  с, а ее ускорение будет равно  $a = 0,3$  м/с<sup>2</sup>.

Как следует из результатов опыта, ускорение  $a$  тележки возрастет во столько раз, во сколько увеличится сила  $F$ , действующая на тележку, т.е.

$$a \sim F. \quad (2)$$



**Ускорение тела неизменной массы прямо пропорционально действующей силе.**

**Опыт 2.** В этот раз будем сохранять действующую на тележку силу неизменной ( $F_1 = 0,1$  Н), но станем изменять массу тележки.

1. Пусть масса тележки будет  $m_1 = 1$  кг. В этом случае тележка пройдет путь  $s = 1$  м за время  $t_1 = 4,5$  с. Как и в первом опыте, ускорение тележки будет равно  $a_1 = 0,1$  м/с<sup>2</sup>.

2. Теперь водрузим на тележку еще одну такую же тележку. Общая масса станет равной  $m_2 = 2$  кг. Тележка пройдет путь  $s = 1$  м за время  $t_2 = 6,5$  с. В этом случае ускорение будет  $a_2 = 0,05$  м/с<sup>2</sup>.

3. Если теперь на тележку из первого опыта поместить две такие же тележки, то масса системы будет  $m_3 = 3$  кг. Тогда путь  $s = 1$  м тележка пройдет за время  $t_3 = 7,8$  с. Ускорение будет равно  $a_3 = 0,033$  м/с<sup>2</sup>.

Как видно из результатов опыта, ускорение тележки уменьшится во столько раз, во сколько раз увеличится масса  $m$  тележки, т.е.

$$a \sim \frac{1}{m}. \quad (3)$$



**Ускорение, приобретенное телом под действием постоянной по величине и направлению силы, обратно пропорционально массе тела.**

### Формула второго закона Ньютона и его формулировка

Результаты проведенных опытов позволяют определить соотношение между ускорением  $a$ , силой  $F$  и массой  $m$ :

$$a = \frac{F}{m}. \quad (4)$$

Это – формула второго закона Ньютона. Он формулируется так:



**Ускорение, которое приобретает тело в результате взаимодействия с другими телами, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе этого тела.**

Второй закон Ньютона можно также выразить в виде

$$F = ma. \quad (5)$$

Вы знаете, что в системе СИ за единицу силы принят ньютон (Н). Из формулы (5) следует, что

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



**1 Н – это сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup>.**

В векторном виде второй закон Ньютона записывается так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (6)$$

*Образец решения задачи*

Хоккейная шайба массой 50 г покоится на льду. Какое ускорение приобретет шайба, если хоккеист ударит по ней с силой 100 Н?

*Дано:*

$$m = 50 \text{ г} = 0,05 \text{ кг};$$

$$F = 100 \text{ Н}.$$

*Найти:*

$$a - ?$$

*Формула:*

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

*Решение:*

$$a = \frac{100 \text{ Н}}{0,05 \text{ кг}} = 2\,000 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

*Ответ:*  $a = 2\,000 \text{ м/с}^2$ .



**Опорные понятия:** второй закон Ньютона.



1. Объясните, в чем заключается опыт 1.
2. Какова зависимость между силой, действующей на тело, и приобретенным телом ускорением при неизменной массе тела?
3. Объясните, в чем заключался опыт 2.
4. Какова зависимость между массой тела и ускорением, приобретенным телом под действием постоянной силы?
5. Сформулируете второй закон Ньютона.
6. Объясните физический смысл единицы силы.



1. В опыте 1 на тележку массой 1 кг действовали силы 0,1; 0,2; 0,3 Н. Найдите соответствующие этим силам ускорения и сделайте вывод.
2. В опыте 2 на тележку действовала неизменная сила 0,1 Н, но масса тела принимала значения 1; 2; 3 кг. Найдите соответствующие этим массам ускорения и сделайте вывод.
3. Тело массой 50 г свободно падает на землю. Найдите силу, действующую на тело. Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
4. На горизонтальной поверхности на тележку по направлению ее движения действует сила 0,1 Н, которое сообщает ей ускорение 0,2 м/с<sup>2</sup>. Найдите массу тележки.



На основе вышеприведенных опытов проводится лабораторная работа на тему: «Изучение зависимости ускорения тела от его массы и приложенной к нему силы».

## § 22. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

### Анализ опытов

В природе действие одного тела на другое никогда не бывает односторонним. Если одно тело действует на другое, то и второе тело оказывает действие на первое.

Проанализируем еще раз опыт, описанный в § 20. Массы тележек, изображенных на рис. 59, равны:  $m_1 = m_2$ . Если сжечь нить, которая держит упругую пластину в согнутом состоянии, то обе тележки начнут двигаться в противоположные стороны с одним и тем же ускорением ( $a_1 = a_2$ ). Это значит, что на обе тележки действуют силы  $F_1$  и  $F_2$ , равные по величине, но имеющие противоположные направления.

Даже если массы взаимодействующих тел будут различны, силы, с которыми действуют друг на друга два тела, будут равны по величине. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим опыт, показанный на рис. 60. После того, как на вторую тележку поместили груз, ее масса увеличилась:  $m_2 > m_1$ . После того, как сожгли нить, тележки стали двигаться в противоположных направлениях, при этом ускорение первой тележки стало больше ускорения второй, т.е.  $a_1 > a_2$ . Во сколько раз большей будет масса второй тележки, во столько же раз ее ускорение будет меньше ускорения первой тележки. Но для каждой тележки произведение массы на ускорение будет одним и тем же, то есть  $m_1 a_1 = m_2 a_2$ . А это значит, что силы взаимодействия будут равны по величине, то есть

$$F_1 = F_2. \quad (1)$$

### Формула третьего закона Ньютона и его формулировка

Хотя в опыте, описанном выше, силы, которые действовали на тележки, были численно равны, тележки под действием этих сил двигались в противоположных направлениях. Поэтому в векторном виде связь между действующими на тележки силами будет иметь вид

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, \quad (2)$$

при этом знак «минус» означает, что силы  $F_1$  и  $F_2$  имеют взаимно противоположные направления.

Эта формула выражает *третий закон Ньютона*, который формулируется следующим образом.



**Два взаимодействующих тела действуют друг на друга с равными по величине, но противоположно направленными силами.**

Одна из взаимодействующих сил называется силой действия, а другая – силой противодействия, и третий закон Ньютона называется также законом действия и противодействия.

Можно привести много примеров проявления третьего закона Ньютона. Например, два мальчика стоят на роликах. С какой силой один из них действует на второго, с такой же силой противодействия он к нему и притягивается (рис. 62).

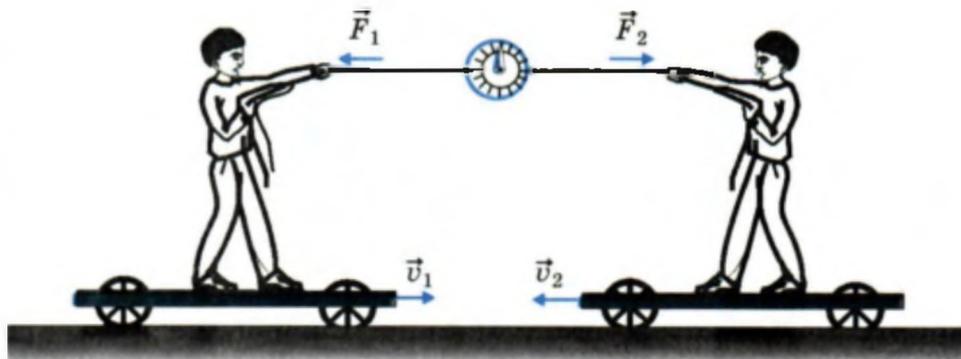


Рис. 62. Проявление силы противодействия.

С какой бы силой ни давила на стол лежащая на нем книга, стол с такой же по величине силой будет противодействовать книге.

Ребенок, стоящий на доске, концы которой опираются на опоры, сгибает доску. В свою очередь доска действует на мальчика с равной по величине силой противодействия. Сила тяжести мальчика направлена вниз, тогда как сила противодействия направлена вверх.

Попробуйте ударить по столу кулаком, с такой же силой стол ответит на ваш удар. Если вы толкнете стену с силой 300 Н, вы почувствуете, что сила противодействия стены тоже 300 Н.

## Следствия из третьего закона Ньютона

Подставляя в формулу третьего закона Ньютона выражения для сил  $F_1 = m_1 a_1$  и  $F_2 = m_2 a_2$ , можно получить следующую формулу:

$$m_1 a_1 = m_2 a_2 \quad \text{или} \quad \frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (3)$$



**Ускорения взаимодействующих тел обратно пропорциональны их массам и имеют взаимно противоположные направления.**

Это утверждение можно проиллюстрировать на примере с двумя тележками разных масс (см. рис. 60).

Учитывая, что  $a_1 = v_1/t$  и  $a_2 = v_2/t$ , из формулы (3) получаем зависимость между массами тел и приобретенными ими скоростями:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (4)$$



**Скорости двух взаимодействующих тел обратно пропорциональны их массам и имеют взаимно противоположные направления.**

Например, если мальчик выпрыгивает из покоящейся лодки, направление движения лодки будет противоположным направлению движения мальчика. Во сколько раз масса лодки будет больше массы мальчика, во столько же раз скорость лодки будет меньше скорости мальчика.

*Образец решения задачи*

Мальчик массой 50 кг выпрыгнул из лодки и за 0,5 с приобрел скорость 10 м/с. Какую скорость разовьет за это же время лодка, если ее масса 200 кг. Какое ускорение за это время приобретут мальчик и лодка?

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= 50 \text{ кг}; \\ m_2 &= 200 \text{ кг}; \\ v_1 &= 10 \text{ м/с}; \\ t &= 0,5 \text{ с}. \end{aligned}$$

Найти:

$$\begin{aligned} v_2 &- ? \quad a_1 - ? \\ a_2 &- ? \end{aligned}$$

Формула:

$$\begin{aligned} \text{Из } \frac{v_1}{v_2} &= \frac{m_2}{m_1} \text{ следует } v_2 = v_1 \cdot \frac{m_1}{m_2}; \\ a_1 &= \frac{v_1}{t}; \\ a_2 &= \frac{v_2}{t}. \end{aligned}$$

Решение:

$$\begin{aligned} v_2 &= 10 \cdot \frac{50}{200} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}; \\ a_1 &= \frac{10}{0,5} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \\ a_2 &= \frac{2,5}{0,5} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \end{aligned}$$

Ответ:  $v_2 = 2,5 \text{ м/с}$ ;  $a_1 = 20 \text{ м/с}^2$ ;  $a_2 = 5 \text{ м/с}^2$ .



**Опорные понятия:** третий закон Ньютона, сила действия, сила противодействия.



1. Как выражается формула третьего закона Ньютона?
2. Как формулируется третий закон Ньютона?
3. Почему третий закон Ньютона называется законом действия и противодействия?
4. Объясните опыт, изображенный на рис. 62.
5. Как, согласно третьему закону Ньютона, записывается и формулируется зависимость между ускорениями и массами взаимодействующих тел?



1. Какие силы будут действовать на мальчиков (см. рис. 62) и какие скорости они приобретут, если масса обоих мальчиков одинакова, за веревку будет тянуть один из них, а второй будет только держать ее?
2. Пусть масса одного мальчика (см. рис. 62) вместе с тележкой равна 52 кг, а масса другого вместе с тележкой 56 кг. Первый мальчик тянет второго с силой 40 Н. С какой силой второй мальчик тянет первого? Какое ускорение приобретет каждая из тележек? Скорость какой из тележек будет большей?
3. Мальчик, стоящий на тележке, тянет за веревку, прикрепленную к стене, с силой 80 Н. При этом тележка за 1 с приобрела скорость 2 м/с. Какое ускорение приобрела тележка и какова масса мальчика вместе с тележкой?
4. Когда на покоящееся тело воздействовали силой 5 Н, оно приобрело ускорение 1 м/с<sup>2</sup>. С какой силой нужно воздействовать на это тело, чтобы оно приобрело ускорение 4 м/с<sup>2</sup>?

## § 23. ПРИЛОЖЕНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ К ВРАЩАТЕЛЬНОМУ ДВИЖЕНИЮ

### Центростремительная сила

Тело, равномерно движущееся по окружности, обладает ускорением. Мы назвали это ускорение центростремительным ( $a_{ц.стр.}$ ). Вы знаете, что если прикрепленный к нити шарик с радиусом  $R$  и массой  $m$  вращается

с линейной скоростью  $v$ , то ускорение, приобретенное шариком, выражается в виде

$$a_{\text{ц.стр}} = \frac{v^2}{R}. \quad (1)$$

Ускорение движущегося тела возникает в результате действия на него силы. Какая сила служит причиной возникновения ускорения при вращательном движении?

При вращательном движении ускорение направлено к центру вращения. Сила, вынуждающая тело двигаться по окружности, имеет то же направление. Поэтому эту силу называют *центростремительной силой* и обозначают ее  $F_{\text{ц.стр}}$ . Так как, согласно второму закону Ньютона,  $F_{\text{ц.стр}} = ma_{\text{ц.стр}}$ , получаем:

$$F_{\text{ц.стр}} = \frac{mv^2}{R}. \quad (2)$$



**Центростремительная сила, действующая на тело, прямо пропорциональна массе и квадрату линейной скорости и обратно пропорциональна радиусу окружности.**

Вращая привязанный к нити шарик, мы действуем на него силой, направленной по нити (рис. 63). Сила  $F_{\text{ц.стр}}$  будет тянуть шарик к центру вращения.

Линейная скорость  $v$  шарика направлена по касательной к окружности, т.е. перпендикулярна к центростремительной силе.

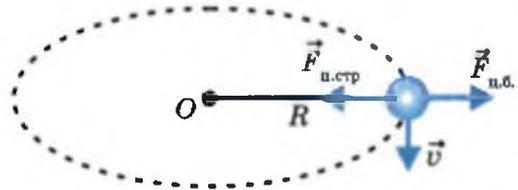


Рис. 63. Силы, действующие на шарик при вращательном движении.

### Центробежная сила

Третий закон Ньютона имеет место и при вращательном движении. Центростремительной силе, действующей на шарик, численно равна сила, направленная противоположно. Эта сила называется *центробежной силой*.

Как и центростремительная сила  $F_{\text{ц.стр}}$ , центробежная сила  $F_{\text{ц.б.}}$  выражается формулой:

$$F_{\text{ц.б.}} = \frac{mv^2}{R}. \quad (3)$$

Формулы, выражающие центростремительную и центробежную силы, одинаковы, но эти силы имеют противоположное направление, т.е.

$$\vec{F}_{\text{ц.стр.}} = -\vec{F}_{\text{ц.б.}} \quad (4)$$

Если набрать в ведро воду примерно до его половины и вращать ведро вокруг себя, то вода из ведра не прольется. На нее будет действовать центробежная сила, направленная от центра вращения.

Существованием центробежной силы пользуются на практике. Например, в аппарате для сушки белья его укладывают в барабан, в стенках которого проделаны отверстия. При вращении барабана с большой угловой скоростью на капли воды в ткани действует центробежная сила, выбрасывающая их через отверстия в водосборник. В результате белье в барабане подсыхает.

В сепараторе молоко отделяют от сливок. При быстром вращении барабана сепаратора молоко разделяется на две части. Обезжиренное молоко под действием центробежной силы покидает барабан и собирается в специальном сосуде, а сливки остаются в центре барабана.

*Образец решения задачи*

Шарик массой 100 г, привязанный к нити длиной 50 см, вращают по окружности. Найдите линейную скорость шарика и действующую на него центробежную силу, если период вращения шарика равен 0,5 с.

Дано:	Формула:	Решение:
$m = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг};$ $R = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м};$ $T = 0,5 \text{ с}.$	$v = \frac{2\pi R}{T};$ $F_{\text{ц.б.}} = \frac{mv^2}{R}.$	$v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \text{ м}}{0,5 \text{ с}} = 6,3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$ $F_{\text{ц.б.}} = \frac{0,1 \cdot (6,3)^2}{0,5} \text{ Н} = 8 \text{ Н}.$
<p><i>Найти:</i></p> $v = ? \quad F_{\text{ц.б.}} = ?$		<p><i>Ответ:</i> <math>v = 6,3 \text{ м/с}; F_{\text{ц.б.}} = 8 \text{ Н}.</math></p>



**Опорные понятия:** центростремительная сила, центробежная сила.



1. Какое явление наблюдается под воздействием центростремительной силы?
2. Как выражается формула центростремительной силы?
3. Какая сила называется центробежной?
4. Почему формула центробежной силы совпадает с формулой центростремительной силы? Чем они отличаются друг от друга?

5. Как в повседневной жизни используется центробежная сила?
6. Привяжите к нити небольшое тело и попробуйте вращать его. Как проявляются при вращении центростремительная и центробежная силы?



1. Шарик массой 20 г, привязанный к нити длиной 25 см, вращают по окружности. Найдите линейную скорость шарика и действующую на него центробежную силу, если период вращения шарика равен 0,2 с.
2. А. Решите задачу из пункта 1, увеличив массу шарика в два раза.  
Б. Решите задачу из пункта 1, увеличив длину нити в два раза.  
В. Решите задачу из пункта 1, увеличив период вращения шара в 2 раза. Сравните решения задач А, Б, В с решением задачи 1 и сделайте выводы.
3. Мотоцикл вращается по окружности цирковой арены с диаметром 25 м со скоростью 45 км/ч. Какова масса мотоцикла вместе с мотоциклистом, если действующая на него центробежная сила равна 2,5 кН? Какое центростремительное ускорение приобретает он при этом?

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ IV

- ◆ Инерция – это свойство тел сохранять свое состояние. Все тела обладают инерцией.
- ◆ Первый закон Ньютона – закон инерции: Каждое тело, на которое не действуют другие тела, сохраняет свое состояние покоя или прямолинейного равномерного движения.
- ◆ Сила – это мера взаимодействия тел. Основная единица силы – ньютона (Н). Сила измеряется с помощью динамометра.
- ◆ Инертность – это свойство тела сохранять состояние покоя или движения в отсутствие внешних сил.
- ◆ Масса – это физическая величина, характеризующая инертность тела.
- ◆ Формула второго закона Ньютона:  $a = \frac{F}{m}$  или  $F = ma$ .

- ◆ Формулировка второго закона Ньютона: Ускорение, которое приобретает тело в результате действия на него других тел, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе этого тела.
- ◆ Формула третьего закона Ньютона:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .
- ◆ Формулировка третьего закона Ньютона: Два взаимодействующих тела действуют друг на друга с равными по величине, но противоположно направленными силами.
- ◆ Тело, совершающее вращательное движение, притягивается к центру окружности определенной силой. Это – центростремительная сила, которая выражается формулой:  $F_{\text{ц.стр}} = \frac{mv^2}{R}$ .
- ◆ Тело, совершающее вращательное движение, стремится удалиться от центра под влиянием определенной силы. Это – центробежная сила, которая выражается формулой:  $F_{\text{ц.б.}} = \frac{mv^2}{R}$ .
- ◆ Численные значения центробежной и центростремительной сил одинаковы, но эти силы имеют противоположное направление:  $\vec{F}_{\text{ц.стр.}} = -\vec{F}_{\text{ц.б.}}$ .

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ IV

1. Тело массой 2 кг свободно падает на землю. Найдите силу, действующую на тело. Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. С какой неизменной силой надо воздействовать на тело массой 200 г, чтобы оно двигалось с ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ ?
3. При воздействии на вагон, стоящий на железнодорожном пути, силой, равной 2 Н, он начал двигаться с ускорением  $0,1 \text{ м/с}^2$ . Найдите массу вагона.
4. Тело массой 0,5 кг, находящееся в состоянии покоя, пришло в движение под действием неизменной силы и за 5 с прошло 20 м. Определите значение силы, действующей на тело.
5. На ровной горизонтальной поверхности лежит стальной шарик массой 100 г. С каким ускорением начнет двигаться шарик, если

- его толкнуть в горизонтальном направлении с силой 50 мН? Силой трения пренебречь.
- При воздействии на тележку, стоящую на ровной горизонтальной поверхности, неизменной силой, равной 4 Н, она приобрела ускорение  $2 \text{ м/с}^2$ . Какое ускорение приобретет тележка при воздействии на нее силой, равной 6 Н?
  - Определите скорость тележки из задачи 6 для обоих значений силы.
  - Автомобиль массой 2 000 кг начал двигаться с ускорением  $0,8 \text{ м/с}^2$ . С какой силой действует мотор на автомобиль? Силу трения не учитывать.
  - Два тела с массами 0,5 и 1,5 кг, двигавшиеся навстречу друг другу, столкнулись и остановились. С какой скоростью двигалось второе тело до столкновения, если скорость первого была равна  $6 \text{ м/с}$ ?
  - Трактор, толкая прицеп с силой 10 кН, придает ему ускорение  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Какое ускорение придаст прицепу другой трактор, имеющий силу тяги 30 кН?
  - Сила тяги двигателей реактивного самолета массой 80 т равна 120 кН. С каким ускорением двигается самолет, чтобы набрать скорость?
  - При ударе по мячу массой 0,4 кг в течение 0,01 с он набрал скорость  $20 \text{ м/с}$ . С какой силой ударили по мячу?
  - Шарик массой 100 г, привязанный к нити длиной 25 см, за одну секунду совершает два оборота по окружности. Найдите действующую на шарик центробежную силу и центростремительное ускорение.
  - Во сколько раз увеличатся центробежная сила и центростремительное ускорение, если шарик из задачи 13 совершит за одну секунду четыре оборота по окружности?
  - Тело, привязанное к нити длиной 1 м, в каждую секунду совершает один оборот по окружности. Какой должна быть масса тела, чтобы сила, действующая на него, равнялась 10 Н?
  - От колес автомобиля, увязшего в грунтовой дороге, со скоростью  $10 \text{ м/с}$  отлетают куски глины. С какой силой отлетают от колес куски глины, если диаметр колес автомобиля 1 м, а средняя масса кусков глины 5 г?



## Глава V. ВНЕШНИЕ СИЛЫ И ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

### § 24. СИЛА УПРУГОСТИ

#### Деформация

Если воздействовать на тела силой, они под ее влиянием растягиваются, сжимаются, сгибаются, сдвигаются или скручиваются. В некоторых телах это свойство наблюдается отчетливо. Например, под воздействием внешней силы резина или пружина растягиваются, сжимаются и скручиваются, а дерево или пластмасса сгибаются.



**Изменение формы и объема тела под влиянием внешней силы называется деформацией.**

Деформации делятся на упругие и пластические. Если при прекращении воздействия внешней силы изменившаяся форма и объем возвращаются в исходное состояние, то такая деформация называется **упругой**. Например, после прекращения действия внешней силы растянутая резина или пружина возвращаются в свое исходное состояние. Если слегка согнуть линейку и отпустить, она снова выпрямится. Такие тела называются **упругими телами**.

Если после прекращения воздействия внешней силы форма и объем тела не восстанавливаются, то такая деформация называется **пластической**. Например, если смять или растянуть кусочек пластилина, он не вернется в свое прежнее состояние. Такие тела называются **пластическими телами**.

Ниже будем рассматривать только упругие тела.

#### Проявления упругой силы

На рис. 64, а изображена тонкая доска, лежащая на двух опорах. Если на середину доски сядет ребенок, она вначале прогнется, а затем

останется в этом состоянии (рис. 64, б). Какая сила остановила сгибание доски?

Под действием силы тяжести ребенка доска согнется, то есть деформируется. Если силу тяжести ребенка, которая деформирует доску, назвать внешней силой  $\vec{F}_{\text{вн}}$ , то сила, противодействующая сгибанию доски, будет упругой силой  $\vec{F}_{\text{упр}}$ . Когда значения внешней силы  $\vec{F}_{\text{вн}}$  и упругой силы  $\vec{F}_{\text{упр}}$  становятся равными, сгибание доски прекращается. Направления этих сил взаимно противоположны. В этом проявляется третий закон Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{вн.}} = -\vec{F}_{\text{упр.}} \quad (1)$$



**Сила, противодействующая внешней силе, деформирующей тело, и имеющая взаимно противоположное ей направление, называется силой упругости.**

При натяжении тетивы лука (рис. 65), растягивании или сжатии резины или пружины возникает сила упругости  $F_{\text{упр}}$ , противодействующая внешней силе  $F_{\text{вн.}}$ .

### Закон Гука

Подвесим к пружине, прикрепленной к опоре, груз, действующий как внешняя сила  $\vec{F}_{\text{вн.}}$ . При этом пружина, деформируясь, растянется на длину  $\Delta l$ . Появится упругая сила  $\vec{F}_{\text{упр}}$ , равная внешней силе  $\vec{F}_{\text{вн.}}$ , но направленная противоположно ей (рис. 66). Эта сила будет прямо пропорциональна удлинению  $\Delta l$ , т.е.

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta l \quad (2)$$

где  $k$  – жесткость пружины, за единицу которой в СИ принят Н/м.

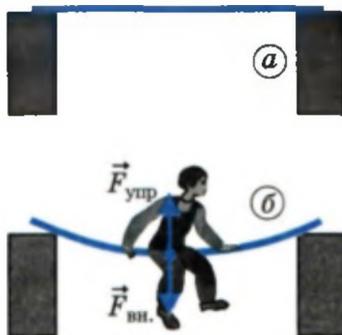


Рис. 64. Сгибание доски.

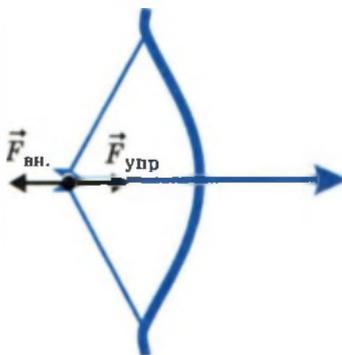


Рис. 65. Натяжение тетивы лука.

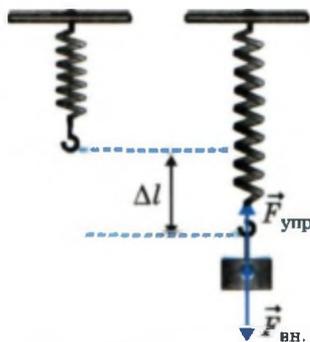


Рис. 66. Растяжение пружины.

Формула (2) выражает открытый в 1660 г. английским ученым Робертом Гуком закон, названный в его честь *законом Гука*:



**Величина упругой деформации тела прямо пропорциональна действующей на него внешней силе.**

Чем большей будет жесткость  $k$  тела (пружины, резины), тем труднее будет деформировать его. Жесткость  $k$  упругого тела различна для разных тел. Например, жесткость стержня длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  выразится формулой:

$$k = E \frac{S}{l}, \quad (3)$$

где  $E$  – *модуль упругости* вещества, из которого сделан стержень. Для разных тел он различен.

Если пружина под действием внешней силы  $F_{\text{вн.}}$  сожмется, то ее длина уменьшится на  $\Delta l$ . И в этом случае будет иметь место закон Гука. Если взять вместо пружины стальной стержень, алюминиевую проволоку или другие тела, то и они под действием внешней силы деформируются, и проявится сила упругости.

*Образец решения задачи*

К проволоке, один конец которой прикреплен к опоре, подвешен груз, действующий на нее с силой тяжести 300 Н. Найдите жесткость проволоки, если под действием этого груза она растянулась на 0,5 мм.

<p><i>Дано:</i></p> $F_{\text{вн.}} = 300 \text{ Н};$ $\Delta l = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}.$ <hr style="width: 100%;"/> <p><i>Найти:</i></p> <p><math>k - ?</math></p>	<p><i>Формула:</i></p> $F_{\text{вн.}} = k\Delta l;$ $k = \frac{F_{\text{вн.}}}{\Delta l}.$	<p><i>Решение:</i></p> $k = \frac{300 \text{ Н}}{0,0005 \text{ м}} = 600\,000 \frac{\text{Н}}{\text{м}} =$ $= 6 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$ <p><i>Ответ:</i> <math>k = 6 \cdot 10^5 \text{ Н/м}.</math></p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



**Опорные понятия:** деформация, упругая деформация, пластическая деформация, упругое тело, пластическое тело, закон Гука, модуль упругости.



1. Что называется деформацией?
2. В чем разница между упругой и пластической деформациями?
3. Что такое сила упругости и как она проявляется?
4. Какая зависимость имеется между силой упругости и внешней силой?

5. Как выражается и формулируется закон Гука?
6. Потяните за свободный конец резины, другим концом привязанной к опоре. Какие силы проявятся при этом? Каковы их направления?



1. Найдите жесткость пружины, растянувшейся под действием силы 4 Н на 5 см.
2. На сколько растянется резина с жесткостью 500 Н/м под действием силы 10 Н?
3. Под действием какой внешней силы сжалась на 4 см пружина с жесткостью 1000 Н/м.
4. На сколько растянется буксировочный трос, если грузовик тянет на буксире легковую машину с силой 1 кН? Жесткость троса  $10^5$  Н/м.
5. Жесткость куска проволоки равна  $2 \cdot 10^5$  Н/м. Какова будет жесткость половины этого куска проволоки?
6. Две пружины одинаковой длины, прикрепленные одна к другой, растягиваются с обоих свободных концов. При этом пружина с жесткостью 100 Н/м растянулась на 4 см. Чему равна жесткость второй пружины, если она растянулась на 2 см?

## § 25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

(Лабораторная работа 2)

**Цель работы:** расширение представлений о деформации и жесткости на примере определения жесткости пружины простейшего динамометра, закрепление теоретических знаний о силе упругости.

**Необходимые принадлежности:** штатив, простейший динамометр, набор грузов, миллиметровая бумага.

### Порядок выполнения работы

1. Приклейте к динамометру миллиметровую бумагу.
2. Прикрепите динамометр к штативу, как показано на рис. 67.
3. Отметьте начальное показание динамометра на миллиметровке.
4. Подвесьте на крюк динамометра груз массой  $m_1$  и измерьте растяжение  $\Delta l_1$  пружины. Запишите результат в таблицу.

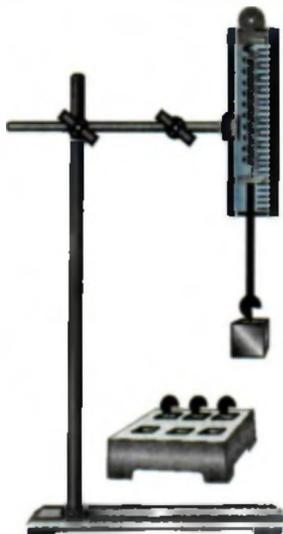


Рис. 67. Принадлежности для определения жесткости пружины.

5. Замените груз массой  $m_1$  вначале на груз массой  $m_2$ , а затем на груз массой  $m_3$ . Найдите растяжение  $\Delta l_2, \Delta l_3$  в обоих случаях и запишите результаты в таблицу.

6. По формуле  $F_{\text{вн}} = mg$  найдите для каждого груза внешнюю силу, действующую на пружину, и запишите результаты в таблицу (примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ).

7. По формуле  $k = F_{\text{вн.}}/\Delta l$  найдите для каждого значения  $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$  и вычисленного значения силы  $F_{\text{вн.1}}, F_{\text{вн.2}}, F_{\text{вн.3}}$  жесткости  $k_1, k_2, k_3$  и запишите результаты в таблицу.

8. По формуле  $k_{\text{ср}} = (k_1 + k_2 + k_3)/3$  найдите среднее значение жесткости и запишите результаты в таблицу.

Таблица

№	$m$	$F_{\text{вн.}}$	$\Delta l$	$k$	$k_{\text{ср.}}$
1					
2					
3					



1. Найдите направление и величину силы упругости пружины под действием внешней силы, определяемой  $m_1, m_2, m_3$ .
2. Объясните причину возникновения силы упругости при подвешивании на крюк динамометра различных грузов.
3. Почему жесткости  $k_1, k_2, k_3$  имеют примерно одно и то же значение при каждом измерении?

## § 26. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

### Открытие закона всемирного тяготения

Вы знаете, что Луна обращается вокруг Земли, Земля – вокруг Солнца. Почему Луна «не убегает» от Земли, Земля – от Солнца? Потому что Луна и Земля, Земля и Солнце взаимодействуют друг с другом, притягиваются друг к другу с определенной силой. Какова природа этой силы? С какими величинами она связана?

Обобщив наблюдения своих предшественников и свои собственные, Исаак Ньютон в 1687 г. пришел к следующему выводу (рис. 68).



**Сила притяжения Земли и Солнца прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

Ньютон показал, что подобная сила притяжения существует не только между Землей и Солнцем, но и между Луной и Землей, между другими планетами и Солнцем, окружающими нас предметами и Землей.

На основании вывода Ньютона сила всемирного тяготения определяется следующим образом:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – массы взаимодействующих тел,  $R$  – расстояние между ними,  $G$  – коэффициент пропорциональности, называемый гравитационной постоянной. На латыни *gravitas* означает *тяжесть, притяжение*.

Эта формула выражает *гравитационную силу притяжения* между любыми телами Вселенной, поэтому закон Ньютона называется *законом всемирного тяготения*. Этот закон формулируется так:



**Сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

Английский ученый Генри Кавендиш в 1798 г. определил, что численное значение гравитационной постоянной равно:

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

Так как  $1/1,5 = 0,667$ , при решении задач вместо  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$  можно использовать значение  $(1/1,5 \cdot 10^{10}) \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ .

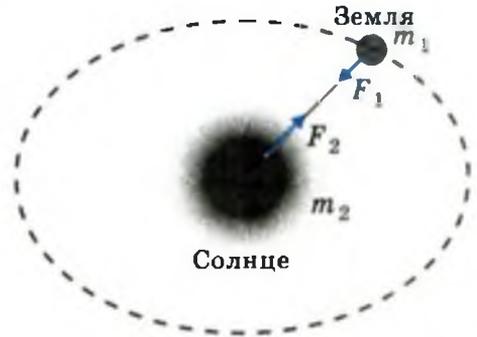


Рис. 68. Притяжение Земли и Солнца друг к другу.

Все окружающие нас тела – машины, люди, мебель, даже дома – притягиваются друг к другу. Однако эти силы настолько малы, что мы их не чувствуем.

### Данные о Земле, Луне и Солнце

При решении задач, относящихся к закону всемирного тяготения, используются данные о Земле, Луне и Солнце. Ниже приводятся эти данные. При решении задач можно пользоваться их приближенными значениями.

1. Средний радиус Земли –  $6,371 \cdot 10^6$  м  $\approx 6,4 \cdot 10^6$  м.
2. Масса Земли –  $5,976 \cdot 10^{24}$  кг  $\approx 6 \cdot 10^{24}$  кг.
3. Среднее расстояние от Земли до Луны –  $3,844 \cdot 10^8$  м  $\approx 3,8 \cdot 10^8$  м.
4. Радиус Луны –  $1,737 \cdot 10^6$  м  $\approx 1,7 \cdot 10^6$  м.
5. Масса Луны –  $7,35 \cdot 10^{22}$  кг  $\approx 7,3 \cdot 10^{22}$  кг.
6. Среднее расстояние от Земли до Солнца –  $1,496 \cdot 10^{11}$  м  $\approx 1,5 \cdot 10^{11}$  м.
7. Радиус Солнца –  $6,96 \cdot 10^8$  м  $\approx 7 \cdot 10^8$  м.
8. Масса Солнца –  $1,99 \cdot 10^{30}$  кг  $\approx 2 \cdot 10^{30}$  кг.

*Образец решения задачи*

Найдите силу притяжения между Землей и Солнцем.

Дано:	Формула:	Решение:
$m_1 = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $m_2 = 2 \cdot 10^{30}$ кг; $R = 1,5 \cdot 10^{11}$ м; $G = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10}} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$	$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$	$F = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10}} \frac{6 \cdot 10^{24} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{(1,5 \cdot 10^{11})^2} \text{ Н} =$ $\approx 3,6 \cdot 10^{22} \text{ Н}.$
<p>Найти:</p> $F = ?$		<p>Ответ: <math>F \approx 3,6 \cdot 10^{22}</math> Н.</p>



**Опорные понятия:** закон всемирного тяготения, гравитационная сила притяжения, гравитационная постоянная.



1. В чем заключается вывод Ньютона о взаимном притяжении тел?
2. Как выражается формула закона всемирного тяготения?

3. Почему закон, основанный на гравитационной силе притяжения, называется законом всемирного тяготения?
4. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
5. Кто и когда определил значение гравитационной постоянной? Чему равно ее значение?
6. Почему мы не чувствуем взаимного притяжения окружающих нас тел?



1. Найдите силу притяжения между Землей и Луной.
2. Два мальчика, масса каждого из которых равна 50 кг, стоят на расстоянии 1 м друг от друга. С какой силой, согласно закону всемирного тяготения, мальчики притягиваются друг к другу?
3. В морском порту на расстоянии 100 м друг от друга стоят два больших корабля. С какой силой они притягиваются друг к другу, если масса каждого из них 1000 т?
4. Зная массу вашего тела, массу и радиус Земли, вычислите силу вашего притяжения к Земле. Примите расстояние между вами и Землей равным радиусу Земли.

## § 27. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Почему тела на поверхности Земли притягиваются Землей? Справедлив ли для них закон всемирного тяготения?

Воспользовавшись формулой закона всемирного тяготения, найдем, с какой силой притягивает Земля тело массой  $m_1 = m = 1$  кг, находящееся на ее поверхности (рис. 69):

$$F = G \frac{mM}{R^2}. \quad (1)$$

За расстояние между Землей и телом примем радиус Земли, т.е.  $R = 6,4 \cdot 10^6$  м. Находим силу притяжения тела массой 1 кг и Земли массой  $M = 6 \cdot 10^{24}$  кг:

$$F = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10}} \frac{1 \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6,4 \cdot 10^6)^2} \text{ Н} \approx 9,8 \text{ Н}.$$

Таким образом, тело массой 1 кг притягивается к Земле с силой 9,8 Н.

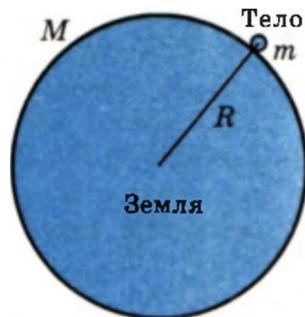


Рис. 69. Схема взаимного притяжения Земли и тела на ее поверхности.

Согласно третьему закону Ньютона, силе притяжения тела к Земле противодействует сила притяжения Земли к телу, равная ей, но имеющая противоположное направление. Однако здесь можно говорить лишь о притяжении тела массой 1 кг к Земле с силой 9,8 Н, так как заметить, на сколько Земля сдвинулась при этом с места, не удастся.

Согласно второму закону Ньютона, ускорение тела, приобретенное им под действием силы притяжения Земли, будет равно:

$$a = \frac{F}{m}. \quad (2)$$

Значит, под действием силы притяжения Земли тело массой 1 кг приобретает ускорение, равное 9,8 м/с<sup>2</sup>.

С какой силой притягиваются к Земле тела произвольной массы, например  $m = 8$  кг или 25 кг? Какое ускорение они получают под воздействием этой силы?

$$\text{для } m = 8 \text{ кг: } F = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10}} \frac{8 \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6,4 \cdot 10^6)^2} \text{ Н} \approx 78,4 \text{ Н}; \quad a = \frac{78,4 \text{ м}}{8 \text{ с}^2} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$\text{для } m = 25 \text{ кг: } F = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10}} \frac{25 \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(6,4 \cdot 10^6)^2} \text{ Н} \approx 245 \text{ Н}; \quad a = \frac{245 \text{ м}}{25 \text{ с}^2} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Итак, независимо от массы тела, ускорение которое приобретает тело под влиянием силы притяжения к Земле, имеет одинаковое значение, т.е. равно 9,8 м/с<sup>2</sup>. Оно было названо нами *ускорением свободного падения* и обозначено буквой  $g$ . Здесь же мы вывели значение ускорения свободного падения.

Силу притяжения тела к Земле назовем *силой тяжести* и обозначим ее буквой  $F_T$ . Подставляя в формуле второго закона Ньютона вместо ускорения  $a$  ускорение свободного падения  $g$ , получаем формулу силы тяжести тела массой  $m$ :

$$F_T = mg. \quad (3)$$



**Сила притяжения тела к Земле называется силой тяжести.**

Формула (3) выражает также зависимость между силой тяжести тела и его массой. Формула (3) показывает, что на поверхности Земли измеряемая в ньютонах сила тяжести больше массы тела, измеряемой в килограммах, в 9,8 раз.

**Образец решения задачи**

Найдите силу тяжести стоящего на мосту грузовика массой 10 т.  
С какой силой действует грузовик на мост?

**Дано:**  
 $m = 10 \text{ т} = 10\,000 \text{ кг};$   
 $g = 9,8 \text{ м/с}^2.$

**Найти:**

$F_T - ?$

**Формула:**

$F_T = mg.$

**Решение:**

$F_T = 10\,000 \cdot 9,8 \text{ Н} =$   
 $= 98\,000 \text{ Н} = 98 \text{ кН}.$

**Ответ:**  $F_T = 98 \text{ кН}$ ; грузовик действует на мост с такой же силой – 98 кН.



**Опорные понятия:** сила притяжения между телом и Землей, притяжение Земли, притяжение тела к Земле, сила тяжести тела.



1. Как выражается сила притяжения к Земле тела массой  $m$ ?
2. Как на основе формул закона всемирного тяготения и второго закона Ньютона определяется ускорение свободного падения?
3. Почему сила взаимного притяжения между телом и Землей называется силой тяжести этого тела?
4. Как выражается формула силы тяжести?



1. С какой силой книжный шкаф массой 200 кг притягивается к Земле? Какова сила тяжести шкафа? В данной и следующих задачах примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Зная вашу массу, найдите вашу силу тяжести.
3. Сила тяжести автомобиля, стоящего на обочине дороги, равна 20 кН. Найдите массу автомобиля.

## § 28. ВЕС ТЕЛА

В физике наряду с понятием силы тяжести существует еще понятие веса. Чтобы понять, что такое вес тела, рассмотрим следующие два опыта.

**Опыт 1.** К пружине, прикрепленной к подвесу, подвесим груз массой  $m$ . На пружину будет действовать направленная вертикально вниз сила тяжести  $F_T = mg$ . Под действием этой силы пружина растянется, то

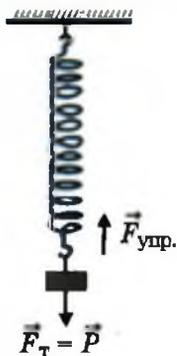


Рис. 70.

Действие силы тяжести тела на подвес.

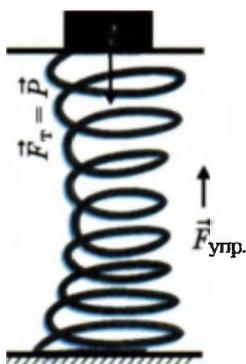


Рис. 71.

Действие силы тяжести тела на опору.

есть деформируется. В результате появится сила упругости пружины  $F_{\text{упр}}$  (рис. 70).

Что такое сила упругости и как она проявляется?

Сила упругости  $F_{\text{упр}}$  появляется как сила, противодействующая силе тяжести  $F_T$  и направленная вертикально вверх. Через некоторое время сила упругости  $F_{\text{упр}}$  сравняется по величине с силой тяжести  $F_T$ , и пружина с подвешенным к ней грузом придет в состояние покоя. В результате на подвес будет действовать сила, равная силе тяжести  $F_T$ . Эта сила – вес тела, подвешенного к пружине.

**Опыт 2.** Если на пружину поместим на подставке груз массой  $m$ , пружина сожмется, т.е. деформируется. В результате снова появится сила упругости  $F_{\text{упр}}$  пружины, противодействующая дальнейшему ее сжатию. Увеличиваясь, сила упругости  $F_{\text{упр}}$  сравняется по величине с силой тяжести  $F_T$ , и тело придет в состояние покоя. В состоянии покоя на подставку будет действовать сила, равная силе тяжести  $F_T$  (рис. 71). Эта сила – вес тела, положенного на подставку.



Сила, действующая на подвес или опору вследствие притяжения к Земле, называется **весом тела** и обозначается буквой  $P$ .

В описанных выше опытах, после того, как тело придет в состояние покоя, вес тела  $P$  будет равен силе тяжести  $F_T$ . Вес тела, находящегося в состоянии покоя, выражается формулой:

$$P = mg.$$

Необходимо различать понятия веса и силы тяжести. Во-первых, сила тяжести – эта сила притяжения тела к Земле, а вес тела – это сила, действующая на подвес или подставку. Во-вторых, сила тяжести не зависит от вертикально направленного ускорения тела в том или ином месте, т.е. постоянна. А вес тела остается неизменным только в состоянии покоя или равномерного вертикального движения.

Если тело совершает вертикально направленное переменное движение, его вес изменяется. Пусть, например, масса тела, подвешиваемого к пружине из опыта 1, равна 100 г, т.е. 0,1 кг. Тогда сила тяжести этого тела будет  $F_T = 0,1 \cdot 9,8 \text{ Н} = 0,98 \text{ Н} \approx 1 \text{ Н}$ . Эта сила остается неизменной и в случае, когда тело подвешено к пружине, и в случае растяжения пружины, и в случае, когда тело находится в состоянии покоя. Однако вес тела возрастает при значениях от 0 до 1 Н. В момент подвешивания к пружине тело не оказывает воздействия на подвес, к которому прикреплена пружина, т.е. его вес равен 0. Через короткий промежуток времени пружина начнет растягиваться, и действие тела на подвес станет увеличиваться, т.е. вес тела будет изменяться от 0 до 1 Н. С прекращением растяжения пружины, т.е. с наступлением равновесия тела, вес его становится равным 1 Н.

В опыте 2 наблюдается аналогичное.

В повседневной жизни вместо массы чаще употребляется понятие веса тела. Например, взвешивая на весах массу продукта, говорят, что измеряют его вес. Это, однако, нельзя считать ошибкой, так как продукт взвешивается на весах в состоянии покоя, или равновесия. А в состоянии покоя вес можно подсчитывать в килограммах или граммах.

#### Образец решения задачи

Груз, подвешенный на крюк динамометра, через некоторое время пришел в равновесие. При этом динамометр показал 10 Н. Какова масса груза, подвешенного на крюк динамометра? Какова сила упругости пружины динамометра в состоянии равновесия? А вес груза? Можно ли с помощью динамометра измерить массу груза?

*Дано:*

*Формула:*

*Решение:*

$$F_T = 10 \text{ Н};$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

$$F_T = mg; \quad m = \frac{F_T}{g} \quad \left| \quad m = \frac{10}{9,8} \approx 1 \text{ кг}.$$

*Найти:*

$$m - ? \quad F_{\text{упр.}} - ? \quad F_T - ?$$

*Ответ:* 1)  $m \approx 1 \text{ кг}$ ; 2)  $F_{\text{упр.}} = F_T = 10 \text{ Н}$ ;  
3)  $P = F_{\text{упр.}} = 10 \text{ Н}$ ; 4) массу можно измерить с помощью динамометра, стоящего на

земле. Для этого шкала динамометра должна быть градуирована в килограммах и граммах. В процессе измерения пружина динамометра должна находиться в состоянии равновесия.



**Опорные понятия:** действие силы тяжести на подвес, действие силы тяжести на подставку, вес тела.



1. Объясните по рис. 70 вес тела, подвешенного к пружине.
2. Поразмышляйте о весе тела, помещенного на подставку, изображенную на рис. 71.
3. Что называется весом тела?
4. В чем состоит разница между весом тела и силой тяжести?
5. В быту вместо массы тела используется понятие веса. Верно ли это? Обоснуйте свой ответ.



1. К пружине, прикрепленной к подвесу, подвешен груз массой 50 г. Чему будет равен вес тела, когда сила упругости пружины сравняется с силой тяжести и пружина окажется в состоянии равновесия? Примите здесь и далее  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. На подставку, установленную на пружину, поместили груз массой 80 г. Чему будет равен вес груза, когда пружина придет в равновесие?
3. На крюк динамометра, находящегося в неподвижном состоянии, подвешен груз массой 200 г. Каков вес груза в состоянии равновесия? А сила упругости?
4. Найдите свой вес, находясь в состоянии покоя и зная массу своего тела.

## § 29. ПЕРЕГРУЗКА И НЕВЕСОМОСТЬ

### Перегрузка

Подвесим к динамометру груз массой  $m$ , держа его в состоянии покоя. При достижении равновесия вес тела будет  $P = F_{\tau}$  или  $P = mg$  (рис. 72, а).

Если теперь динамометр вместе с грузом резко направим вверх, пружина динамометра растянется. Через некоторое время, когда сила упругости пружины сравняется с весом тела, тело начнет двигаться вверх с ускорением  $a$  (рис. 72, б). В это время возрастет показание динамометра, а значит, увеличится и вес тела. При этом увеличение веса будет равно  $ma$ :

$$P = F_{\tau} + ma \quad \text{или} \quad P = mg + ma. \quad (1)$$



При движении тела с ускорением, направленным вертикально вверх, его вес увеличивается. Это увеличение веса называется *перегрузкой*.

В повседневной жизни мы часто ощущаем на себе перегрузки. Пусть, например, лифт начинает из состояния покоя подниматься вверх с ускорением  $a$ . В этом случае человек, находящийся в лифте, будет давить на пол лифта с силой, увеличившейся на величину  $ma$ , где  $m$  – его масса (рис. 73).

Перегрузки ощущают пассажиры самолета, стремительно взмывающего в небо. Особенно велика перегрузка, которую испытывает космонавт, находящийся в ракете, стартующей вертикально вверх.

### Невесомость

Приведем теперь динамометр с подвешенным к нему телом в движение с ускорением, направленным вертикально вниз. При этом пружина динамометра сожмется. В тот же момент сила упругости пружины придет в равновесие с весом тела, и тело начнет двигаться вниз с ускорением  $a$  (рис. 74, а). Показания динамометра укажут на уменьшение веса тела на величину, равную  $ma$ :

$$P = F_T - ma \quad \text{или} \quad P = mg - ma. \quad (2)$$



При движении тела с ускорением, направленным вертикально вниз, его вес уменьшается.

Если лифт из состояния покоя начинает опускаться с ускорением  $a$ , то вес человека, находящегося в лифте, уменьшается на величину  $ma$ .

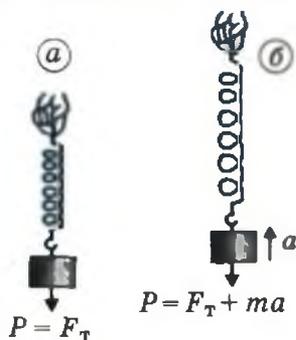


Рис. 72. Тело в состоянии покоя (а) и при движении с ускорением, направленным вверх (б).



Рис. 73. Движение лифта с ускорением.

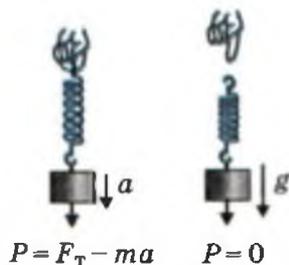


Рис. 74. Движение тела с ускорением  $a$  (а) и  $g$  (б), направленным вертикально вниз.

Если выпустить динамометр из рук, то он будет падать вниз с ускорением  $a = g$ . Ясно, что шкала динамометра во время падения покажет, что вес груза обратился в нуль, т.е. покажет состояние невесомости (рис. 74, б):

$$P = m(g - a) = m(g - g) = 0.$$

Тело, падающее вниз, находится в состоянии невесомости. Свободное падение тела происходит под действием силы тяжести – силы всемирного тяготения. Все тела в космосе находятся под воздействием Земли, Луны, Солнца, планет, звезд и других небесных тел. Поэтому состояние невесомости можно определить следующим образом:



**Любое тело, которое совершает свободное падение только под действием силы всемирного тяготения, будет находиться в состоянии невесомости.**

В состоянии невесомости находятся космический корабль, совершающий полет по орбите вокруг Земли, члены его экипажа, самолет, пикирующий с ускорением, равным ускорению свободного падения. В состоянии невесомости космонавт свободно плавает внутри космического корабля. В этом состоянии его вес равен нулю.

*Образец решения задачи*

Силач поднял вверх лежащий на земле камень массой 64 кг. При этом камень приобрел ускорение  $2,7 \text{ м/с}^2$ . Найдите силу тяжести камня. Каков был вес камня в момент подъема?

*Дано:*

$$\begin{aligned} m &= 64 \text{ кг}; \\ a &= 2,7 \text{ м/с}^2; \\ g &= 9,8 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

*Найти:*

$$F_T - ? \quad m - ?$$

*Формула:*

$$\begin{aligned} F_T &= mg; \\ P &= mg + ma; \\ P &= m(g + a). \end{aligned}$$

*Решение:*

$$\begin{aligned} F_T &= 64 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 630 \text{ Н}; \\ P &= 64 \text{ кг} \cdot (9,8 + 2,7) \text{ м/с}^2 = 800 \text{ Н}. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $F_T \approx 630 \text{ Н}; P = 800 \text{ Н}.$



**Опорные понятия:** перегрузка, состояние невесомости тела.



1. Что называется перегрузкой? Приведите примеры.
2. С каким ускорением должно падать тело вертикально вниз, чтобы проявилось состояние невесомости?
3. Объясните, в чем заключается состояние невесомости, и приведите примеры.



1. Две книги с одной и той же массой 400 г, положенные друг на друга, поднимают вертикально вверх с ускорением  $5 \text{ м/с}^2$ . С какой силой давит при этом на нижнюю книгу, та книга, которая находится сверху? В этой и следующих задачах считайте, что  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Вес тела массой 3 кг, которое поднимают вверх, достиг 39 Н. Найдите ускорение, с которым поднимают тело.
3. Стопка книг, о которой идет речь в упражнении 1, падает вниз с ускорением  $5 \text{ м/с}^2$ . С какой силой давит при этом на нижнюю книгу та книга, которая находится сверху?
4. Стопка книг из упражнений 1 и 3 падает вертикально вниз с ускорением свободного падения. С какой силой давит при этом на нижнюю книгу та книга, которая находится сверху?

### § 30. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ ЗЕМЛИ

#### Движение тела, брошенного горизонтально

Предположим, что с башни высотой 80 м уронили на землю тело. Принимая ускорение  $g = 10 \text{ м/с}^2$ , можно вычислить, что за 1-ю секунду тело пройдет 5 м, за 2-ю – 20 м, 3-ю – 45 м, за 4-ю – 80 м (рис. 75).

Пусть тело брошено с высокой башни горизонтально с начальной скоростью  $v_0$ . Совершая криволинейное движение под действием силы притяжения, тело упадет на землю на расстоянии  $s$  от подножия башни.

Остановимся на двух особенностях движения тела, брошенного с башни в горизонтальном направлении.

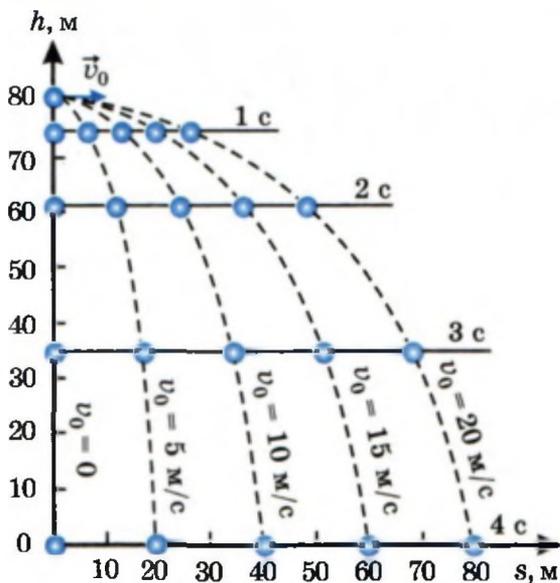


Рис. 75. Движение тела, брошенного с высоты в горизонтальном направлении.

**Во-первых**, тело, брошенное вертикально вниз с высоты 80 м, упадет на землю за 4 с. Тело, брошенное с этой высоты в горизонтальном направлении с начальной скоростью 5, 10, 15, 20 м/с, упадет на землю в каждом из этих случаев через те же 4 с. Даже высота тела в конце 1-й, 2-й, 3-й секунд будет той же, что и при свободном падении на землю.



**Тело, брошенное с высоты вертикально вниз, упадет на землю за то же время, что и тело, брошенное с высоты в горизонтальном направлении.**

**Во-вторых**, тело, брошенное горизонтально, за равные промежутки времени будет удаляться от башни на равные расстояния. Если спроецировать на поверхность земли криволинейную траекторию движения тела, то его проекция будет выражать прямолинейное равномерное движение. Поэтому расстояние от подножия башни до места падения тела будет:

$$s = v_0 t. \quad (1)$$

Если тело, как показано на рис. 75, брошено с башни высотой 80 м с начальной скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с, вычисляем расстояния, на которые оно будет удаляться от башни каждый раз. Принимая  $t = 4$  с, из формулы (1) находим расстояние  $s$  для каждого значения начальной скорости  $v_0$ :

- 1) при  $v_0 = 5$  м/с  $s = 5$  м/с  $\cdot$  4 с = 20 м;
- 2) при  $v_0 = 10$  м/с  $s = 10$  м/с  $\cdot$  4 с = 40 м;
- 3) при  $v_0 = 15$  м/с  $s = 15$  м/с  $\cdot$  4 с = 60 м;
- 4) при  $v_0 = 20$  м/с  $s = 20$  м/с  $\cdot$  4 с = 80 м.

### Первая космическая скорость

Рассматривая движение тела, брошенного горизонтально, мы считали поверхность Земли плоской и не учитывали ее шарообразную форму. Поверхность Земли можно считать плоской в случае, если тело брошено горизонтально на расстояние нескольких десятков и сотен метров. Однако шарообразность Земли нужно учитывать, если рассматривается движение тела, запущенного с некоторой высоты на расстояние сотен и тысяч километров.

Предположим, что тело запущено горизонтально с высоты с очень большой начальной скоростью  $v_0$ . Чем большей будет начальная скорость, тем большее расстояние пройдет тело вдоль поверхности Земли. Можно

придать телу такую начальную скорость  $v_1$ , при которой оно на Землю не вернется (рис. 76). Оно превратится в искусственный спутник, движущийся со скоростью  $v_1$  по круговой орбите на высоте  $h$  над Землей.

Какую скорость надо придать телу, чтобы оно двигалось вокруг Земли по окружности?

Известно, что ускорение тела при равномерном движении по окружности определяется формулой  $a = v^2/R$ . Если тело, брошенное горизонтально на небольшом расстоянии от поверхности Земли, оборачивается вокруг земного шара с радиусом  $R$  со скоростью  $v_1$ , вместо ускорения  $a$  можно принять ускорение свободного падения  $g$ . Тогда из формулы  $g = v_1^2/R$  следует:

$$v_1^2 = gR. \quad (2)$$

Так как ускорение свободного падения равно  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  и радиус земного шара  $R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ , то для  $v_1$  получаем:

$$v_1 = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} \text{ или } \boxed{v_1 = 7,9 \text{ км/с.}} \quad (3)$$

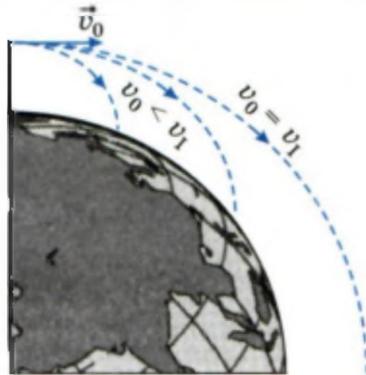


Рис. 76. Достижение космической скорости.



**Тело, брошенное горизонтально на небольшом расстоянии от земной поверхности со скоростью 7,9 км/с, движется по круговой орбите вокруг земного шара. Это значение скорости принято называть первой космической скоростью.**

#### Образец решения задачи

Стоя на скале, мальчик бросил горизонтально в сторону озера камень со скоростью 15 м/с. Через 2 с после броска камень упал в воду. На какой высоте над уровнем озера находится скала? По проекции движения камня определите расстояние, на которое он упал. Учтите, что рука мальчика в момент броска была на высоте 1 м от скалы. Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Дано:

$$v_0 = 15 \text{ м/с};$$

$$t = 2 \text{ с}; h_0 = 1 \text{ м};$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2.$$

Найти:

$$h_1 - ? \quad s - ?$$

Формула:

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

$$h_1 = h - h_0;$$

$$s = v_0 t.$$

Решение:

$$h = \frac{10 \cdot 2^2}{2} \text{ м} = 20 \text{ м};$$

$$h_1 = (20 - 1) \text{ м} = 19 \text{ м};$$

$$s = 15 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ с} = 30 \text{ м}.$$

Ответ:  $h_1 = 19 \text{ м}; s = 30 \text{ м}.$



**Опорные понятия:** движение тела, брошенного горизонтально, первая космическая скорость.



1. Проанализируйте движение тела, брошенного горизонтально.
2. Как определяется расстояние от места падения тела, брошенного с башни, до подножия этой башни?
3. Какое условие должно быть выполнено, чтобы тело, запущенное в горизонтальном направлении, двигалось вокруг Земли по круговой орбите?
4. Что такое первая космическая скорость и чему она равна?



1. Тело брошено с башни в горизонтальном направлении со скоростью 8 м/с и через 3 с упало на землю. Найдите высоту башни. На каком расстоянии от башни упало тело? В этой и следующих задачах примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Тело брошено горизонтально с башни с начальной скоростью 12 м/с и упало на землю в 60 м от подножия башни. Найдите время падения тела на землю и высоту башни.
3. Автомобиль движется со скоростью 80 км/ч, а самолет – 900 км/ч. Во сколько раз скорость каждого из них меньше первой космической скорости?

## § 31. ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

### Скорость, необходимая для движения ракеты по околоземной орбите

Если ракета движется по околоземной орбите на высоте нескольких сотен и тысяч метров с первой космической скоростью, то ее температура резко возрастает в результате сопротивления и трения воздуха, и она вспыхивает и сгорает. Но в безвоздушном пространстве движение ракеты с такой скоростью возможно.

Пространство, находящееся на высоте нескольких сотен километров от Земли, можно считать почти безвоздушным. Ракеты, запущенные в космос, летают на такой высоте. Какой должна быть первая космическая скорость, чтобы ракета двигалась по круговой орбите вокруг Земли, например, на высоте  $h = 300 \text{ км}$ ?

Для этого в формуле первой космической скорости  $v_1^2 = gR$  радиус  $R$  надо заменить на  $R + h$ . С увеличением высоты значение ускорения свободного падения начнет уменьшаться и на высоте 300 км от Земли

оно будет равно  $g = 9,0 \text{ м/с}^2$ . Согласно вычислениям, чтобы ракета двигалась по круговой орбите на высоте 300 км от Земли, ей надо сообщить скорость 7,7 км/с.



**Ракеты и космические корабли, запущенные в космическое пространство и совершающие орбитальное движение вокруг Земли, называются искусственными спутниками Земли.**

Для того чтобы искусственный спутник Земли двигался по околоземной орбите на высоте 300 км от поверхности Земли, ему надо сообщить скорость не менее 7,7 км/с.

Для запуска искусственных спутников используются мощные ракетносители, поднимающие их на нужную высоту. Спустя некоторое время скорость ракеты достигает первой космической скорости и начинается горизонтальное движение искусственного спутника (рис. 77).

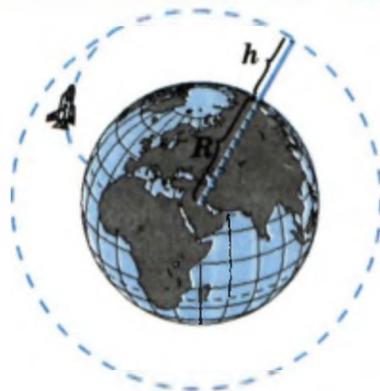


Рис. 77. Траектория движения ракеты по орбите на высоте  $h$ .

### Освоение космоса

Впервые в истории человечества искусственный спутник Земли был выведен на орбиту 4 октября 1957 г. Он имел форму шара и массу 83 кг. Мощный ракетноситель сообщил ему первую космическую скорость, так что он стал двигаться по орбите Земли и превратился в искусственный спутник.

12 апреля 1961 г. на космическом корабле «Восток» впервые совершил пилотируемый полет **Юрий Алексеевич Гагарин**. Он совершил один оборот вокруг нашей планеты и благополучно приземлился на Землю. С этого времени началось освоение и изучение в широких масштабах космического пространства. Сотни космонавтов и астронавтов на космических кораблях, обращающихся вокруг Земли, выполняют различные научные исследования.

В освоении космоса есть еще одна знаменательная дата – 21 июня 1969 г. впервые в истории человечества на поверхность Луны был доставлен пилотируемый модуль с астронавтами **Н. Армстронгом**, **Е. Олдриджем**.

Достойный вклад в освоение космоса внесли и наши соотечественники. Уроженец кишлака Искандар в Ташкентской области летчик-космо-



Бюст, установленный  
космонавту  
В. Джанибекову  
в Ташкенте.



Космонавт Салиджан  
Шарипов.

навт Владимир Джанибеков совершил пять полетов в космос (1978, 1981, 1982, 1984, 1985 гг.), проведя на орбите в общей сложности 145 дней. За это время он дважды выходил в открытый космос и участвовал в ремонте корпуса космического аппарата. За заслуги в области космонавтики В. Джанибеков дважды удостоен звания героя (1978 и 1981 гг.). В 1985 г. ему присвоено звание генерал-майора авиации. В Ташкенте в честь нашего летчика-космонавта установлен его бюст.

22 января 1998 г. уроженец киргизского города Ош узбекский парень Салиджан Шарипов в составе международного экипажа совершил полет на космическом корабле, запущенном США. В 2004 г. С. Шарипов во второй раз отправился в космос, теперь в составе российского экипажа, и провел в космосе в течение длительного времени обширные научные исследования.

В настоящее время космонавтика получила еще большее развитие. В космическом пространстве работает множество управляемых с Земли искусственных спутников различных стран. Кроме выполнения космических исследований, искусственные спутники следят за состоянием атмосферы Земли, процессами, происходящими на земной поверхности, также обеспечивают радио-, телекоммуникации и сотовую телефонную связь на всей территории планеты.

В направлении всех планет Солнечной системы запущены управляемые с Земли космические аппараты, которые посылают на Землю

различную информацию с других планет.

При изучении предыдущих тем, мы познакомились с первой космической скоростью и вычислили ее значение. Существуют также вторая и третья космические скорости. Согласно вычислениям, вторая космическая скорость равна  $v_{II}=11,2$  км/с. Если сообщить искусственному спут-

нику вторую космическую скорость, он покинет околоземную орбиту и превратится в искусственный спутник Солнца.

Если ракета будет двигаться со скоростью  $v_{III} = 16,7$  км/с в направлении орбитального движения Земли, то она обретет третью космическую скорость и покинет Солнечную систему.



**Опорные понятия:** ракета, искусственный спутник, космос, космический корабль, вторая космическая скорость, третья космическая скорость.



1. Какой должна быть первая космическая скорость ракеты, чтобы она двигалась по круговой орбите вокруг Земли на высоте 300 км?
2. Что такое искусственный спутник Земли?
3. Как искусственный спутник выводится на орбиту?
4. Расскажите об освоении и исследовании космоса?
5. Что вы знаете о второй и третьей космических скоростях?

## § 32. СИЛА ТРЕНИЯ. ТРЕНИЕ ПОКОЯ

### Сила трения

Еще одна сила, которая изучается в механике, – это сила трения. Санки, скатывающиеся с пригорка, перейдя на движение в горизонтальном направлении, постепенно снижают свою скорость и, наконец, останавливаются. Значит, существует сила, препятствующая движению санок. Можно ощутить сопротивление некоторой силы и при попытке сдвинуть с места груз (рис. 78).



Рис. 78. Проявление силы трения.



Сила, возникающая при движении одного тела по поверхности другого и препятствующая движению, называется силой трения.

Для того чтобы сдвинуть стопку книг, лежащих на столе, надо приложить силу. Шайба, скользящая по льду, снижает скорость и останавливается.

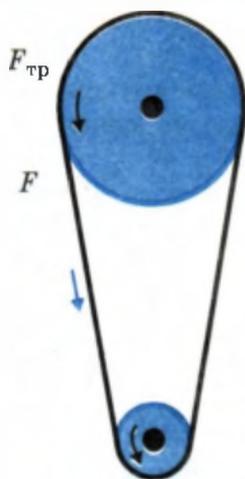


Рис. 79. Проявление трения в шкиве.

ливается. В этих примерах между книгами и поверхностью стола, между шайбой и поверхностью льда появляется сила трения. Благодаря силе трения ременная передача приводит во вращение шкивы (рис. 79).



**Первая причина возникновения силы трения – шероховатости соприкасающихся поверхностей.**

Даже на очень гладких поверхностях имеются неровности и царапины. Даже на кажущейся очень гладкой поверхности льда при рассмотрении сквозь лупу видны шероховатости.

При скольжении или при качении одного тела по поверхности другого именно эти неровности служат причиной появления сил, препятствующих движению.



**Вторая причина возникновения силы трения – взаимное притяжение молекул соприкасающихся участков.**

При тщательной обработке поверхностей молекулы соприкасающихся участков тел оказываются на очень малых расстояниях друг от друга. Благодаря взаимному притяжению молекул ощущается появление сил сцепления, направленных в сторону, противоположную движению.

Возникающие при этом силы трения бывают трех родов: *трение покоя*, *трение скольжения*, *трение качения*.

## Трение покоя

Если тело находится в состоянии относительного покоя, сила трения держит его на месте и препятствует попыткам сдвинуть его с места. Так как эта сила возникает до начала движения, она называется *силой трения покоя*.

С помощью транспортера можно поднять грузы вверх. При этом сила, удерживающая грузы на ленте транспортера, – это сила трения покоя (рис. 80).

Мебель и другие предметы, находящиеся в комнате, неподвижно стоят на полу благодаря силе трения покоя. Если бы не было силы трения, эти предметы начали бы скользить по полу при любом толчке.

Для того чтобы привести в движение предмет, стоящий на полу, в горизонтальном направлении, т.е. сдвинуть его, на него надо воздействовать силой, равной по величине силе трения покоя, но имеющей противоположное направление.

При ходьбе возникает сила трения покоя между поверхностью подошв и поверхностью дороги. Мы отталкиваем землю назад с силой  $F$ . Сила трения  $F_{\text{тр}}$  направлена в сторону движения и равна по величине силе  $F$  (рис. 81).

Чтобы получить представление о том, как мы отталкиваем землю, можно для примера рассмотреть тредбан, используемый бегунами для тренировок. Если спортсмен бежит по тредбану вперед, отталкивая опору, ролики тредбана движутся в обратном направлении (рис. 82).

Шины автомобиля также отталкивают землю назад. Благодаря возникновению силы трения покоя между поверхностью шины и поверхностью земли колеса автомобиля движутся вперед.

Силу трения покоя можно измерить. Если положить деревянное тело на горизонтальную поверхность и тянуть его с помощью динамометра, то хотя тело и остается неподвижным, динамометр указывает на ее появление. И только при достижении некоторого предельного значения силы  $F = F_{\text{тр.п}}$  тело сдвинется с места (рис. 83, а). Здесь  $F_{\text{тр.п}}$  – сила трения покоя.



Рис. 80. Поднятие груза наверх с помощью транспортера.



Рис. 81. Проявление трения при ходьбе.

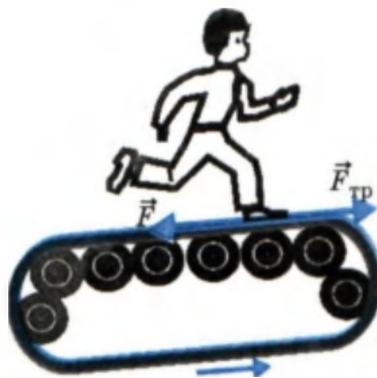


Рис. 82. Движение роликов тредбана вследствие трения.



Сила, необходимая для того, чтобы вывести тело из состояния покоя, называется *силой трения покоя*.



**Опорные понятия:** сила трения, трение покоя, сила трения покоя.



1. Дайте определение силы трения. В какую сторону она направлена?
2. На основе рис. 78 и 79 укажите причины возникновения силы трения.
3. Что называется силой трения покоя?
4. Как проявляется трение покоя в вашей повседневной жизни?

### § 33. ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

#### Трение скольжения



При скольжении одного тела по поверхности другого возникает трение. Такое трение называется *трением скольжения*.

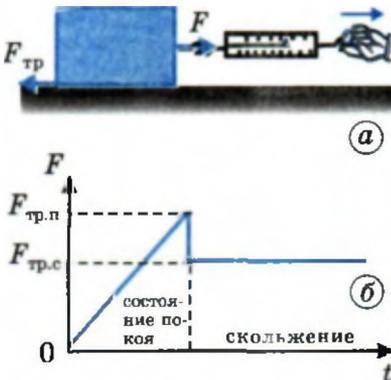


Рис. 83. Проявление силы трения покоя (а) и силы трения скольжения (б).

Например, трение скольжения возникает, когда мы тянем книги по поверхности стола.

На рис. 83, а показано, что как только удастся вывести тело из состояния равновесия, показания динамометра резко уменьшаются. Если продолжать тянуть тело динамометром, его показания останутся постоянными. Это постоянное значение динамометра равно силе трения скольжения. Значит, сила трения скольжения меньше силы трения покоя (рис. 83, б).

Как показывает опыт, сила  $F$ , действующая на горизонтально движущееся тело,

прямо пропорциональна весу  $P$  тела. Как следует из третьего закона Ньютона, сила трения скольжения  $F_{\text{тр.с}}$  равна по величине силе  $F$ , действующей на тело. Значит, сила трения скольжения  $F_{\text{тр.с}}$  также прямо пропорциональна весу  $P$  тела:

$$F_{\text{тр.с}} = \mu P, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения, величина которого зависит от материала соприкасающихся тел, гладкости поверхностей и многого другого. Значения коэффициента трения для ряда материалов приводятся в таблице.

Таблица

№	Материал	$\mu$	№	Материал	$\mu$
1	Медь по льду	0,02	5	Бронза по чугуну	0,2
2	Сталь по льду	0,04	6	Дерево по дереву	0,4
3	Сталь по стали	0,12	7	Кожа по чугуну	0,6
4	Сталь по бронзе	0,15	8	Резина по бетону	0,75

### Трения качения

Если одно тело катится по поверхности второго без скольжения, то возникающее при этом трение называется *трением качения*.

Например, трение качения возникает при движении колес автомобиля или велосипеда, при перекачивании бревна или бочки.

Основная причина возникновения трения качения заключается в том, что на поверхности, которая соприкасается с колесом, под действием силы тяжести появляется деформация. Чем более жесткими будут поверхность колеса и поверхность, по которой оно катится, тем меньше она будет деформироваться при качении колеса и тем меньше будет сила трения качения  $F_{\text{тр.к}}$ . Именно поэтому на рельсах железнодорожного пути сила трения очень мала.

Силу трения качения можно измерить. Тележку тянут с одинаковой скоростью при помощи прикрепленного к ней динамометра. При этом

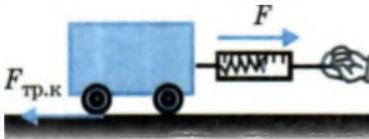


Рис. 84. Определение силы трения качения.

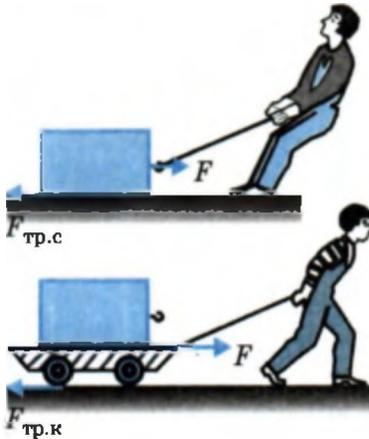


Рис. 85. Сравнение трения скольжения (а) с трением качения (б).

сила трения качения колес тележки  $F_{\text{тр.к}}$  равна значению силы  $F$ , показанной динамометром (рис. 84). Разделив это значение на четыре, можно определить силу трения качения для каждого колеса тележки.

Сила трения качения  $F_{\text{тр.к}}$  во много раз меньше силы трения скольжения  $F_{\text{тр.с}}$  (рис. 85). Именно поэтому люди с древних времен для перемещения тяжелых грузов использовали бревна. Изобретение колеса стало одним из великих открытий человечества.

Опыты показывают, что сила трения качения  $F_{\text{тр.к}}$  прямо пропорциональна весу тела  $P$  и обратно пропорциональна радиусу катящегося тела, т.е.:

$$F_{\text{тр.к}} = \mu_{\text{к}} \frac{P}{R}; \quad (2)$$

здесь  $\mu_{\text{к}}$  – коэффициент трения качения. Его значение зависит от материала соприкасающихся тел, гладкости их поверхности и многих других обстоятельств. Приближенное

значение коэффициента  $\mu_{\text{к}}$  для стали по стали равно 0,2 мм, для резины шин автомобиля по асфальту – 2 мм.

**Образец решения задачи**

Найдите силу трения качения между колесами автомобиля массой 2 т и асфальтом. Диаметр колеса автомобиля 1 м, коэффициент трения качения между резиной шин и асфальтом 2 м,  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

<p><b>Дано:</b></p> <p><math>m = 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг};</math>  <math>D = 1 \text{ м}; \mu_{\text{к}} = 2 \text{ м};</math>  <math>g = 10 \text{ м/с}^2.</math></p> <hr/> <p><b>Найти:</b></p> <p><math>F_{\text{тр.к}} - ?</math></p>	<p><b>Формула:</b></p> <p><math>P = mg;</math>  <math>R = \frac{D}{2};</math>  <math>F_{\text{тр.к}} = \mu_{\text{к}} \frac{P}{R}.</math></p>	<p><b>Решение:</b></p> <p><math>P = 2000 \cdot 10 \text{ Н} = 20000 \text{ Н};</math>  <math>R = \frac{1}{2} \text{ м} = 0,5 \text{ м};</math>  <math>F_{\text{тр.к}} = 2 \cdot \frac{20000}{0,5} \text{ Н} = 80000 \text{ Н} = 80 \text{ кН}.</math></p> <p><b>Ответ:</b> <math>F_{\text{тр.к}} = 80 \text{ кН}.</math></p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



**Опорные понятия:** трение скольжения, сила трения скольжения, трение качения, сила трения качения, коэффициент трения качения.



1. Какое трение называется трением скольжения?
2. Как выражается формула силы трения скольжения?
3. Что такое сила трения качения? Как выражается ее формула?
4. Как определяется сила трения качения?
5. Расскажите о проявлении сил трения скольжения и трения качения в повседневной жизни.



1. По горизонтальной деревянной доске равномерно тянут маленькую доску массой 5 кг. Найдите силу трения скольжения. Здесь и ниже примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ , значение коэффициента трения приведено в тексте и таблице.
2. По горизонтальной стальной поверхности равномерно тянут изготовленное из стали тело массой 10 кг. С какой силой тянут тело?
3. По горизонтальной стальной поверхности равномерно катят стальной диск радиусом 10 см и массой 3 кг. Найдите возникшую при этом силу трения качения.
4. Диск из задачи 3, положив на бок, равномерно тянут по стальной поверхности. Найдите силу трения скольжения, сравните с найденной в задаче 3 силой трения качения и сделайте вывод.

### § 34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

(Лабораторная работа 3)

**Цель работы:** закрепление знаний о трении скольжения путем определения коэффициента трения скольжения дощечки по деревянной линейке.

**Необходимые принадлежности:** длинная деревянная линейка, дощечка с крючком, динамометр, две гири массой 100 г каждая.

### Порядок выполнения работы

1. Измерьте на весах массу дощечки.
2. По формуле  $P = mg$  найдите вес дощечки.
3. Поместите дощечку на горизонтально лежащую линейку. Прикрепите к дощечке динамометр и равномерно тяните ее вдоль линейки, записывая показания динамометра в таблицу, считая их равными силе трения скольжения  $F_{\text{тр.с.}}$ .
4. По формуле  $\mu = \frac{F_{\text{тр.с.}}}{P}$  вычислите коэффициент трения скольжения.
5. Положите на дощечку сначала гирьку массой 100 г, а затем две гирьки массами по 100 г и продолжите опыт. Для каждого из этих случаев найдите коэффициент трения скольжения и результаты запишите в таблицу.
6. По формуле  $\mu_{\text{ср}} = (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)/3$  найдите среднее значение коэффициента трения скольжения и запишите результат в таблицу.

Таблица

№	$m$ , кг	$P$ , Н	$F_{\text{тр.с.}}$ , Н	$\mu$	$\mu_{\text{ср}}$
1.					
2.					
3.					



1. Как с помощью динамометра определяется сила трения скольжения?
2. Почему показания динамометра можно принять равными по величине силе трения скольжения?
3. Проанализируйте результаты лабораторной работы и сделайте вывод.

## § 35. ТРЕНИЕ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

### Значение трения

В природе и технике трение играет важную роль. Трение может быть полезным или вредным. Если трение оказывается полезным, его стараются увеличить, если вредным – уменьшить.

Представим себе, что случилось бы, если бы не было трения. Если бы не было трения, то ни люди, ни животные не смогли бы ходить по земле. При ходьбе мы отталкиваемся ногами от земли. По льду ходить трудно, так как сила трения мала. Если бы не было силы трения, предметы выскользнули бы у нас из рук.

Автомобиль останавливается при торможении благодаря силе трения. Если бы не было трения покоя, автомобиль не сдвинулся бы с места, колеса вращались бы, а автомобиль стоял бы на месте. Для увеличения силы трения на поверхность шины наносится протектор.

Сила трения покоя удерживает мебель на полу, гвозди, забитые в доску, не выпадают, узлы, завязанные на веревке, не развязываются.

Различным органам животных трение помогает выполнять функции удержания. Например, усикам растений, хоботу слона, хвосту карабкающихся животных трение позволяет виться, держать предметы и удерживать равновесие.

### **Вредное трение и его уменьшение**

Трение во многих случаях вредно для предметов, движущихся по поверхности других предметов. В этом случае используются различные средства уменьшения трения. Например, различные движущиеся части машин и станков в результате трения разогреваются и раскаляются. Для уменьшения трения их поверхности делают гладкими, используют смазку.

С целью уменьшения трения на вращающиеся валы машин и станков устанавливаются подшипники. Часть подшипника, непосредственно соприкасающаяся с валом, называется вкладышем и изготавливается из стали, чугуна или бронзы. На внутреннюю поверхность вкладыша наносится тонкий слой сплава свинца или олова и смазки. Когда вал вращается, он скользит по поверхности вкладыша. Такие подшипники называются подшипниками скольжения.

Применение подшипников скольжения позволяет снизить силу трения между валом и вкладышем.

В технике широко используются шариковые и роликовые подшипники. Их применение оправдано тем, что сила трения качения гораздо меньше силы трения скольжения. В таких подшипниках вращающийся вал

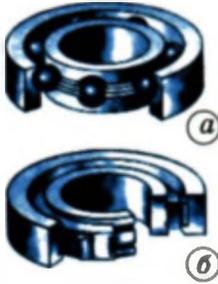


Рис. 86. Шариковые (а) и роликовые (б) подшипники.

не скользит по неподвижному вкладышу, а катится по стальным шарикам и роликам (рис. 86).

Внутреннее кольцо подшипника изготавливается из высококачественной стали и надевается непосредственно на вал. Внешнее кольцо крепится к корпусу машины. При вращении вала внутреннее кольцо катится по шарикам или роликам. Шарики и ролики помещают между кольцами.

При применении шариковых или роликовых подшипников сила трения качения меньше силы трения скольжения в 20–30 раз.

При спуске с горки колеса велосипеда вращаются, даже если не крутить педали. Это происходит потому, что на ось колеса надеты шариковые или роликовые подшипники. Если бы не было подшипников, движение велосипеда было бы затруднено.

Шариковые и роликовые подшипники используются во вращающихся частях автомобилей, станков, электродвигателей и др. Нельзя представить себе современную промышленность и транспорт без использования таких подшипников. В период быстрого развития науки и техники налаживается производство подшипников с очень малой силой трения.



**Опорные понятия:** подшипник, вкладыш, подшипник скольжения, шариковые и роликовые подшипники.



1. Предположите, что трение в природе исчезло, и выскажите свои суждения.
2. Какие вредные силы трения вы знаете?
3. В каких частях колеса автомобиля трение полезно, а в каких – вредно?
4. Расскажите об устройстве и принципе действия подшипников скольжения.
5. Почему подшипники скольжения используются меньше, чем подшипники качения?
6. Расскажите об устройстве и принципе действия шариковых и роликовых подшипников.
7. Что вы знаете об использовании подшипников в производстве и транспорте?

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ V

- ◆ Под действием внешней силы форма и объем тел могут изменяться, т.е. деформироваться.
- ◆ Если после прекращения действия внешней силы деформированное тело возвращается в исходное состояние, то такое тело называется упругим, а в противном случае – пластическим.
- ◆ Закон Гука: Величина упругой деформации тела прямо пропорциональна действующей на него внешней силе, т.е.  $F_{\text{упр.}} = -k\Delta l$ .
- ◆ Закон всемирного тяготения: Сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, т.е.:  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ .
- ◆ Сила тяжести – сила притяжения тел к Земле. Ее формула:  $F_T = mg$ .
- ◆ Вес тела – сила, действующая на подвес или опору вследствие притяжения Земли. Вес тела в состоянии покоя равен  $P = mg$ , а вес тела, движущегося с ускорением  $a$ , направленным вертикально, –  $P = m(g - a)$ . При этом может быть  $a > 0$ ,  $a = 0$ ,  $a < 0$ . При  $a = g$  наблюдается состояние невесомости.
- ◆ Невесомость – это свободное движение тела, совершаемое только под действием гравитационных сил.
- ◆ Первая космическая скорость – это скорость, которую нужно сообщить телу, чтобы его движение под влиянием земного притяжения происходило по орбите вокруг Земли. Ее значение следующее:  $v_1 = 7,9$  км/с.
- ◆ Искусственный спутник Земли – это ракета и космические корабли, запущенные в космическое пространство и совершающие орбитальное движение вокруг Земли.
- ◆ Движению одного тела по поверхности другого препятствует сила трения. Сила трения направлена противоположно движению тела.

- ◆ Трение тел можно разделить на три вида: трение покоя, трение скольжения, трение качения.
- ◆ Сила трения покоя удерживает тело на одном месте и препятствует попыткам сдвинуть его с места.
- ◆ Трение скольжения проявляется при скольжении одного тела по поверхности другого. Сила трения скольжения пропорциональна весу тела:  $F_{\text{тр.с.}} = \mu P$ .
- ◆ Трение качения возникает при качении одного тела по поверхности другого. Сила трения качения прямо пропорциональна весу катящегося тела и обратно пропорциональна его радиусу:  $F_{\text{тр.к}} = \mu_k \frac{P}{R}$ .

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ V

1. Найдите жесткость резины, удлинившейся на 10 см под действием силы 2 Н.
2. При подвешивании к пружинным весам груза в 1 кг их пружина удлинилась на 8 см. Найдите жесткость пружины. В данной и следующих задачах примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
3. При подвешивании груза к пружине, имеющей жесткость 60 Н/м, она удлинилась на 5 см. Найдите массу груза.
4. На сколько удлинится резина, имеющая жесткость 10 Н/м, если к ней подвесить груз 60 г?
5. Две пружины, соединенные друг с другом одним концом, тянут за свободные концы. При этом пружина, имеющая жесткость 120 Н/м, растянулась на 45 см. Какова жесткость второй пружины, если она растянулась на 3 см?
6. Определите, насколько растянется буксировочный трос с жесткостью 40 кН/м при буксировке автомобиля массой 1 200 кг с ускорением 0,3 м/с<sup>2</sup>. Силу трения не учитывать.
7. Расстояние между центрами масс двух автомобилей с массами 1 200 кг равно 5 м. С какой силой автомобили притягиваются друг к другу?

8. Определите силу взаимного притяжения двух кораблей с массами 8 000 и 12 500 т, стоящих друг от друга на расстоянии 50 м.
9. Используя данные, приведенные в § 26, найдите силу притяжения между Солнцем и Землей.
10. С какой силой притягивается к Земле дом массой 100 т? Каков вес дома?
11. Вес грузовика, находящегося на земле в состоянии покоя, равен 10 кН. Найдите массу грузовика.
12. К пружине, прикрепленной к подвесу, подвешен груз массой 150 г. Чему будет равен вес груза при наступлении равновесия между силой, действующей на груз, и силой упругости пружины?
13. Груз брошен с башни в горизонтальном направлении с начальной скоростью 8 м/с и упал на расстояние 40 м от башни. Найдите время падения груза и высоту башни.
14. Чему равна сила тяжести лежащего на земле тела массой 1 кг?
15. Лифт начал двигаться вверх с ускорением 5 м/с<sup>2</sup>. Каков вес мальчика массой 45 кг, находящегося в лифте?
16. Лифт начал двигаться вниз с ускорением 5 м/с<sup>2</sup>. Каков вес мальчика массой 45 кг, находящегося в лифте?
17. По горизонтальной поверхности деревянной доски равномерно скользит деревянная дощечка массой 1 кг. Найдите возникающую при этом силу трения скольжения. Принять  $\mu_c = 0,4$ .
18. Найдите силу трения качения колес автомобиля массой 1 200 кг, равномерно движущегося по асфальтовой дороге. Радиус колес 30 см. Принять  $\mu_k = 0,1$  см.
19. Найдите силу трения скольжения, возникающую вследствие трения шин об асфальт, при торможении автомобиля массой 1 200 кг. Принять  $\mu = 0,75$ .
20. На брусок массой 0,5 кг положили груз в 7 кг и тянут по горизонтальной поверхности с помощью пружины. Каким будет удлинение пружины, если коэффициент трения доски о горизонтальную поверхность равен 0,2, а жесткость пружины 150 Н/м?

# ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Если известны силы, действующие на тело, то законы Ньютона дают возможность решать относящиеся к ним задачи механики. Но во многих случаях эти силы неизвестны, так что непосредственно применить законы Ньютона не удастся. Например, при столкновении двух тел бывает трудно определить значения сил, действовавших на тела. Мы знаем, что при этом появляются силы упругости. Но деформация, возникающая при этом, будет очень велика, а время действия сил очень мало. В таких случаях при решении задач оказываются полезными следствия из законов Ньютона и, в частности, новые физические величины – *импульс* и *энергия*. Для этих величин справедливы законы *сохранения*.

Импульс и энергия и законы сохранения, которым они удовлетворяют, широко используются не только в механике, но и в других разделах физики.

## Глава VI. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА



## Глава VII. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ



## Глава VI. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА



### § 36. ИМПУЛЬС

#### Импульс силы

Слово «импульс» происходит от латинского *impulsus* – толчок.

Результат взаимодействия тел связан с силами, вызвавшими это взаимодействие, и временем, в течение которого оно происходило. Чтобы убедиться в этом, проведем следующие опыты.

**Опыт 1.** Пусть тело подвешено к подвесу на нити так, как показано на рис. 87. Если медленно потянуть тело за прикрепленную нить снизу, то оборвется верхняя часть нити, которая поддерживает тело. Если же резко дернуть за нить, то порвется нижняя ее часть, а не верхняя.

**Опыт 2.** Положим на стол две гладко отполированные дощечки. К нижней дощечке привязана нить. Если медленно потянуть нить, то обе дощечки, не меняя взаимного положения, будут скользить по столу, как одно тело. Если теперь сильно дернуть за нить, то верхняя дощечка заскользит по нижней и останется позади нее или упадет (рис. 88).

Из опытов следует, что взаимодействие тел связано не только с действием сил, но и со временем, в течение которого это действие происходило. Поэтому вводится понятие импульса тела.

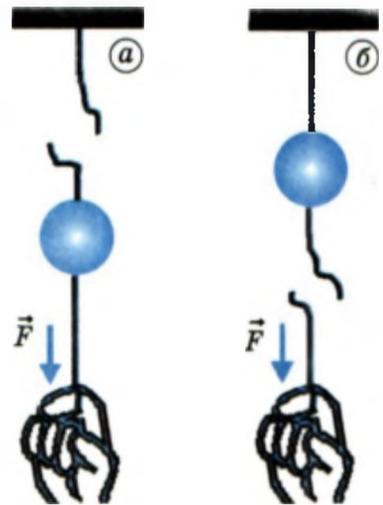


Рис. 87. Разрыв нити при медленном (а) и резком (б) ее натягивании.

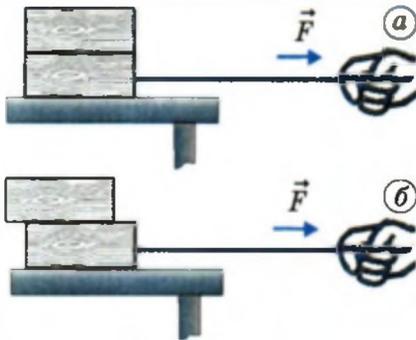


Рис. 88. Положение верхней дощечки при медленном (а) и резком (б) натяжении нити.



**Импульс силы равен произведению силы, действующей на тело, на время действия этой силы.**

То есть:

$$\vec{I} = \vec{F}t. \quad (1)$$

В системе СИ за единицу импульса силы принят  $(\text{Н} \cdot \text{с})$ .  $1 \text{ Н} \cdot \text{с}$  – это импульс силы в  $1 \text{ Н}$ , действовавшей в течение  $1 \text{ с}$ .

Импульс силы – векторная величина, ее направление совпадает с направлением силы.

### Импульс тела

Время от времени при столкновении автомашин удару подвергается дерево, стоящее на обочине дороги, столб или какие-то другие предметы. Например, если автомобиль, движущийся со скоростью  $30 \text{ км/ч}$ , налетит на столб, стоящий на краю дороги, то столб может сломаться или упасть. Но если на столб налетит велогонщик, движущийся с такой же скоростью, то столб останется цел, потому что масса велосипеда вместе с массой гонщика значительно меньше массы автомобиля.

Если же скорость автомобиля достаточно велика, например  $90 \text{ км/ч}$ , то повреждения, которые получают обе стороны, будет гораздо серьезнее тех, которые произойдут в результате столкновения на скорости  $30 \text{ км/ч}$ .

Удар, который нанесет стене попавшее в нее тело массой  $10 \text{ г}$ , движущееся со скоростью  $10 \text{ м/с}$ , будет слабее удара, который получит стена, если в нее попадет движущееся с такой же скоростью тело массой  $100 \text{ г}$ .

Предположим, что пуля массой  $10 \text{ г}$ , вылетевшая из ствола винтовки, движется со скоростью  $600 \text{ м/с}$ . Если пуля попадет в тонкую доску, она пробьет ее, так как удар, который нанесет пуля, будет во много раз сильнее того, с которым ударится в стену тело той же массы, скорость которого равна  $10 \text{ м/с}$ .

Из рассмотренных выше примеров делаем следующие выводы:



1. Чем большей будет масса движущегося тела при неизменной скорости, тем сильнее будет нанесенный им удар.
2. Чем большей будет скорость движущегося тела, тем сильнее будет нанесенный им удар.

Итак, для характеристики движения тела следует рассматривать массу и скорость тела не по отдельности, а в совокупности. С этой целью вводится понятие *импульса тела*.



*Импульсом  $p$  тела* называется произведение массы тела на его скорость.

То есть:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2)$$

В системе СИ за единицу импульса тела принят  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} \cdot 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$  –

это импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

Импульс тела – векторная величина, ее направление совпадает с направлением скорости.

### Связь между импульсом силы и импульсом тела

Пусть скорость тела, которое двигалось с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , за время  $t$  изменилась в результате взаимодействия с другим телом и стала равной  $\vec{v}$ . В этом случае тело совершает равнопеременное движение. Ускорение, которое тело получило в результате взаимодействия, выражается формулой:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (3)$$

Если тело массой  $m$  действует на другое тело с силой  $F$ , то, согласно второму закону Ньютона, для ускорения имеет место формула:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (4)$$

Сравнивая обе формулы ускорения, находим:

$$\frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} \quad \text{или} \quad \boxed{\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0.} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что в этой формуле  $\vec{F}t$  – импульс силы,  $m\vec{v}_0$  – импульс тела до взаимодействия,  $m\vec{v}$  – импульс тела после взаимодействия, приходим к следующему выводу:



**Изменение импульса тела в процессе взаимодействия равно импульсу действующей силы.**

*Образец решения задачи*

Найдите импульсы велосипеда и автомобиля, о которых шла речь в тексте «Импульс тела». Примите, что масса велосипеда вместе с велосипедистом равна 100 кг, а масса автомобиля – 2000 кг.

*Дано:*

*Формула:*

*Решение:*

$$m_B = 100 \text{ кг}; \quad m_A = 1200 \text{ кг};$$

$$p_B = m_B v_B;$$

$$p_B = 100 \cdot 8,3 = 830 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

$$v_B = v_A = 30 \frac{\text{км}}{\text{ч}} \approx 8,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$p_A = m_A v_A.$$

$$p_A = 1200 \cdot 8,3 \approx 10\,000 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

*Найти:*

$$p_B = ? \quad p_A = ?$$

*Ответ:*  $p_B = 830 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}; \quad p_A \approx 10\,000 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$



**Опорные понятия:** импульс, импульс силы, импульс тела.



1. Объясните опыты, изображенные рис. 87 и 88.
2. Как выражается импульс силы? В каких единицах он измеряется?
3. Обоснуйте вывод о том, что чем больше масса движущегося тела, тем сильнее будет нанесенный им удар.
4. Обоснуйте вывод о том, что чем больше будет скорость движущегося тела, тем сильнее будет нанесенный им удар.
5. Как выражается импульс тела? В каких единицах он измеряется?
6. Какая связь существует между импульсом силы и импульсом тела?



1. За нить, прикрепленную к телу, потянули с силой 10 Н в первый раз в течение 2 с, а во второй раз в течение 0,1 с. Найдите в обоих случаях импульс силы, действующей на тело.

2. Найдите импульсы тел с массами 10 и 100 г и импульс пули, о которых шла речь в тексте «Импульс тела».
3. Тело массой 2 кг ударило в стену со скоростью 5 м/с и полностью потеряло скорость. Найдите импульс силы, действовавшей на тело.
4. Шарик массой 100 г и скоростью 0,5 м/с ударил второй шарик и продолжил движение в том же направлении со скоростью 0,2 м/с. Найдите изменение его импульса.

## § 37. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

### Замкнутая система

При запуске с Земли космического корабля систему, состоящую из Земли и корабля, можно считать *замкнутой*, потому что в этом случае можно пренебречь действием на корабль Солнца, Луны и других небесных тел.



Если система тел не взаимодействует с другими телами или если внешние силы взаимно уравновешиваются, то такая система тел называется *замкнутой*.

Если на горизонтальной поверхности сталкиваются несколько шаров, то пренебрегая трением шаров о поверхность стола, систему этих шаров можно считать замкнутой.

### Столкновение тел при равенстве их масс и скоростей

**Опыт 1.** Установим на рельсы две тележки массой  $m$  каждая, как показано на рис. 89. Сила тяжести тележек и сила реакции рельсов взаимно уравновешены. Поэтому рассматриваемую систему можно считать замкнутой.

На одной стороне тележек прикреплены пружинные буферы. На другой стороне первой тележки приклеен кусок пластилина. Сообщим тележкам одну и ту же скорость  $v$ . При этом импульс первой тележки равен  $mv$ . Скорость второй тележки равна скорости первой, но направ-

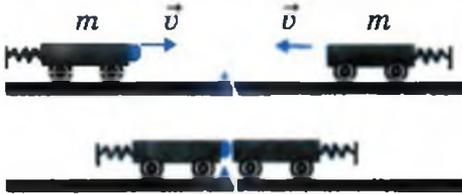


Рис. 89. Импульс каждой тележки равен нулю.

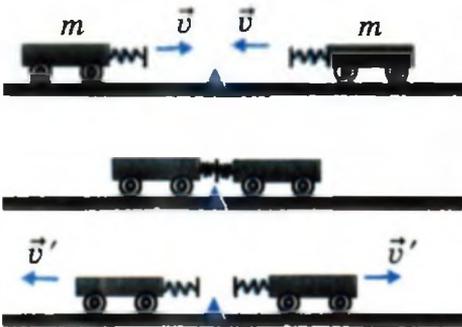


Рис. 90. Сумма импульсов тележек после столкновения равна нулю.

$= -mv' + mv' = 0$ . Таким образом, и в этом случае сумма импульсов тележек до и после столкновения не изменится и будет равна 0.

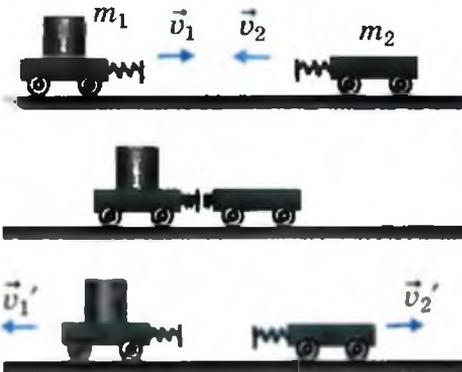


Рис. 91. Столкновение тележек различной массы.

лена противоположно. Поэтому импульс второй тележки равен  $-mv$ . Тогда сумма импульсов тележек будет равна нулю:  $mv + (-mv) = mv - mv = 0$ . После столкновения они прилипнут друг к другу благодаря пластилину, и снова сумма их импульсов будет равна нулю.

**Опыт 2.** Пусть теперь тележки обращены друг к другу пружинными буферами, как на рис. 90. Сообщи́м тележкам равные по величине, но противоположно направленные скорости  $v$ . Как и в первом случае, сумма импульсов тележек до столкновения будет равна 0. Но после столкновения импульс каждой тележки будет отличен от 0, так как после столкновения они разъедутся со скоростями  $v'$ , снова равными по величине, но противоположно направленными. При этом сумма их импульсов будет равна  $m(-v') + mv' =$

### Импульс тел с разными массами и различными скоростями

**Опыт 3.** Пусть массы тележек различны —  $m_1$  и  $m_2$ . Поставим их на рельсы, как показано на рис. 91, и сообщим им различные скорости  $v_1$  и  $v_2$ . После столкновения тележки разъедутся со скоростями  $v_1'$  и  $v_2'$ . Найдем изменение их импульсов:

изменение импульса первой тележки:  $Ft = m_1v_1' - m_1v_1$ .

изменение импульса второй тележки:  $-Ft = m_2v_2' - m_2v_2$ .

сложим почленно эти равенства:  $0 = m_1v_1' - m_1v_1 + m_2v_2' - m_2v_2$   
или  $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$ .

В левой части равенства – сумма импульсов тележек до столкновения, а в правой – после. Следовательно, после столкновения тележек сумма их импульсов остается неизменной, т.е. сохраняется.

### Формулировка закона сохранения импульса

Как видно из изложенного, в результате взаимодействия двух тел в замкнутой системе их импульс сохраняется. Можно доказать, что и в случае замкнутой системы, состоящей из более чем двух тел, сумма их импульсов останется неизменной. В общем случае закон сохранения импульса формулируется следующим образом:



**Сумма импульсов тел замкнутой системы сохраняется неизменной.**

Закон сохранения импульса – один из основных законов физики. Он справедлив не только для макроскопических тел, но и для взаимодействующих молекул, атомов и элементарных частиц.

Закон сохранения импульса широко применяется в природе и технике.

#### Образец решения задачи

Железнодорожный вагон массой 50 т на скорости 9 км/ч столкнулся с неподвижно стоявшим вагоном массой 30 т. Найдите скорости вагонов после столкновения.

**Дано:**

$$\begin{aligned} m_1 &= 50 \text{ т}; \\ m_2 &= 30 \text{ т}; \\ v_1 &= 9 \text{ км/ч}; \\ v_2 &= 0. \quad v_1' = v_2'. \end{aligned}$$

**Найти:**

$$v_1' = v_2' = ?$$

**Формула:**

$$\begin{aligned} m_1v_1 + m_2v_2 &= m_1v_1' + m_2v_2'. \\ m_1v_1 &= (m_1 + m_2)v_1'. \\ v_1' &= \frac{m_1v_1}{m_1 + m_2}. \end{aligned}$$

**Решение:**

$$\begin{aligned} v_1' &= \frac{50 \cdot 9}{50 + 30} \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \\ &\approx 5,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $v_1' = v_2' \approx 5,6 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ .



**Опорные понятия:** замкнутая система, закон сохранения импульса.



1. Дайте определение замкнутой системы и поясните на примерах.
2. Чему равна сумма импульсов тел до их столкновения, если они имеют одинаковые массы и одинаковые по величине, но противоположно направленные скорости.
3. Чему будет равна сумма импульсов тел с одинаковыми массами и одинаковыми по величине, но противоположно направленными скоростями после их столкновения?
4. Чему равна сумма импульсов тел с разными массами и различными скоростями, движущихся по прямой линии навстречу друг другу, до и после их столкновения?
5. Объясните закон сохранения импульса.



1. Вагон, масса которого равна 30 т, движущийся со скоростью 2 м/с, столкнулся с неподвижно стоящим вагоном. Найдите массу второго вагона.
2. Мальчик, масса которого равна 50 кг, бежавший со скоростью 6 м/с, догнал тележку массой 30 кг, которая двигалась со скоростью 2 м/с, и запрыгнул на нее. Чему равна скорость тележки с мальчиком?
3. В опыте 3 (рис. 91) массы тележек 1 и 0,5 кг, а скорости до столкновения равны 2 и 3 м/с соответственно. Найдите скорость, которую после столкновения приобрела вторая тележка, если первая тележка стала двигаться после столкновения со скоростью 1,5 м/с.

## § 38. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

### Понятие о реактивном движении

Одно из важных применений закон сохранения импульса находит в теории реактивного движения.



Если некоторая часть замкнутой системы выбрасывается из нее с определенной скоростью, то возникающее в результате этого движение системы в направлении, противоположном этой скорости, называется *реактивным движением*.

Чтобы получить представление о реактивном движении, проведем следующий опыт.

Наберем в пробирку воду до половины ее объема, закроем пробирку пробкой и установим на тележку так, как показано на рис. 92. Начнем подогревать воду в пробирке. Когда вода в пробирке закипит, пробка вылетит из пробирки под давлением пара, а тележка откатится в противоположном направлении под действием силы, противодействующей давлению пара. Эта сила называется реактивной силой.

Пусть, например, масса пробки  $m_1 = 10$  г, а масса тележки (вместе с горючим и пробиркой)  $m_2 = 500$  г, их начальные скорости  $v_1 = v_2 = 0$ , а скорость полета пробки  $v_1' = 10$  м/с. По закону сохранения импульса вычислим реактивную скорость, которую приобретает тележка при вылете пробки.

Так как в равенстве  $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$   $v_1 = v_2 = 0$ , его левая часть равна нулю:  $0 = m_1v_1' + m_2v_2'$ . Отсюда  $v_2' = -m_1v_1'/m_2$  или  $v_2' = -0,2$  м/с.

Чтобы отчетливо представить себе действие реактивной силы, проведем опыт, изображенный на рис. 93, а. Вода выбрасывается со скоростью  $v_1$ , а трубка под действием реактивной силы движется в противоположном направлении со скоростью  $v_2$ .

А в опыте, показанном на рис. 93, б, вода выбрасывается из двух отверстий согнутой стеклянной трубки. В результате возникает реактивное движение, направленное противоположно движению воды, и стеклянная трубка начинает вращаться.

Реактивное движение можно создать также при помощи воздуха. На рис. 94 показан основной элемент установки для создания реактивного

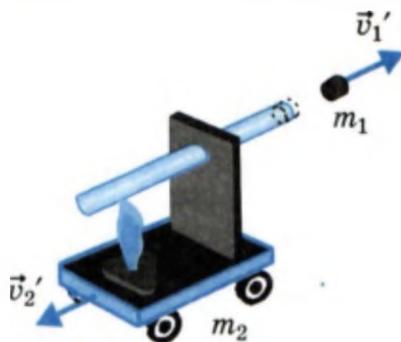


Рис. 92. Реактивное движение, возникшее в направлении, противоположном движению пробки.

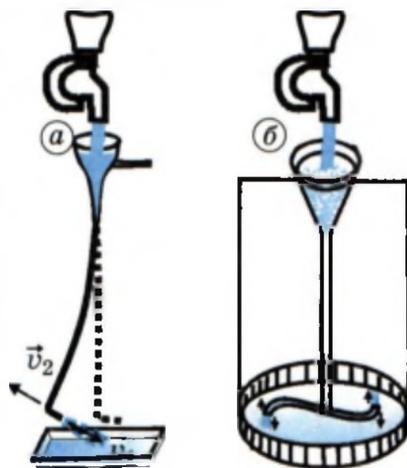


Рис. 93. Реактивное движение, возникшее в направлении, противоположном движению воды.

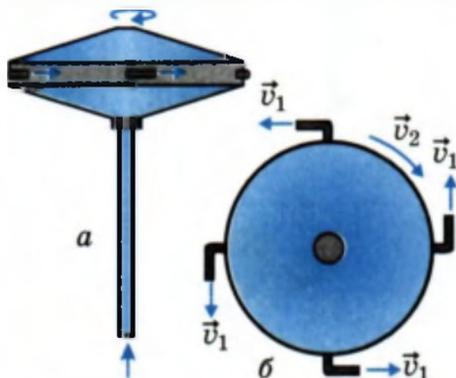


Рис. 94. Установка для создания реактивного движения с помощью воздуха: а) вид сбоку; б) вид сверху.

движения. В ней свободно вращающийся диск установлен на неподвижной трубке с помощью подшипника. Сжатый воздух по трубке проникает внутрь диска. Под действием давления воздух вырывается наружу по касательной через закрепленные по краям диска четыре трубки. Этим самым создается реактивное движение, вращающее диск в противоположном направлении.

Вспомогательный элемент установки служит для создания сжатого воздуха. В качестве вспомогательного элемента можно использовать пылесос.

При подаче по шлангу из пылесоса сжатого под большим давлением воздуха диск за счет реактивного движения вращается с большой скоростью. В качестве вспомогательного элемента можно использовать также надутый воздушный шар.

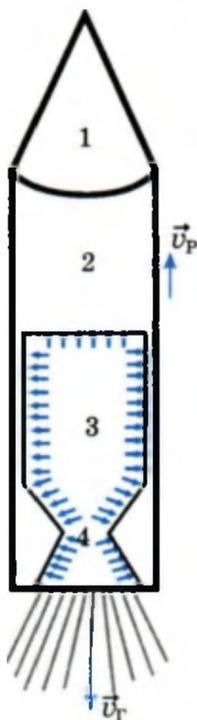


Рис. 95. Схема устройства ракеты.

### Устройство ракеты и ее действие

Начиная с 50-х годов XX века, в космос запускаются во все большем количестве космические корабли и искусственные спутники Земли. Они выводятся на орбиту с помощью ракет-носителей.



**Ракета** – летательный аппарат, движущийся под действием реактивных сил.

Движение ракеты основано на реактивном движении. Структурная схема ракеты изображена на рис. 95. Ракета состоит в основном из четырех частей. В части 1 размещен выводимый на орбиту искусственного спутника Земли космический корабль или сам искусственный спутник. В части 2 находятся топливные баки и устройства для запуска ра-

кеты. В части 3 располагаются камеры сгорания, где сжигается ракетное топливо и образуются газы, находящиеся при высоком давлении и температуре. Эти газы с большой скоростью вырываются наружу через сопло (часть 4). Сопло увеличивает скорость истечения газов. В результате, согласно закону сохранения импульса, возникает реактивная сила, приводящая ракету в движение по направлению, противоположному направлению истечения газов (рис. 96).

Пусть масса выбрасываемых через сопло ракеты газов  $m_r$ , скорость  $v_r$ , масса ракеты  $m_p$ , приобретенная ею реактивная скорость  $v_p$ . Воспользовавшись законом сохранения импульса, можем записать следующее равенство:

$$m_r v_r + m_p v_p = 0 \quad \text{или} \quad v_p = - \frac{m_r v_r}{m_p}$$

Из этой формулы видно, что чем меньше масса ракеты, тем больше ее скорость. Так как большая часть массы ракеты приходится на топливо, которое сгорает в процессе вывода ракеты на орбиту, то с уменьшением его массы уменьшается и масса ракеты, следовательно, возрастает ее скорость. После достижения требуемой высоты на орбиту искусственного спутника выводится космический корабль (искусственный спутник), а ступени ракеты, служившие для вывода ракеты на орбиту, отделяются от головной части и сгорают в атмосфере.

Закон сохранения импульса, лежащий в основе реактивного движения, широко используется в космонавтике. В создание ракетной техники внесли большой вклад русские ученые К.Э. Циолковский (1852–1935), С.П. Королев (1906–1966), М.В. Келдыш (1911–1978), а также В. Браун (1912–1976), Г. Оберт (1894–1989) и др.

Ныне космонавтика развивается усиленными темпами.

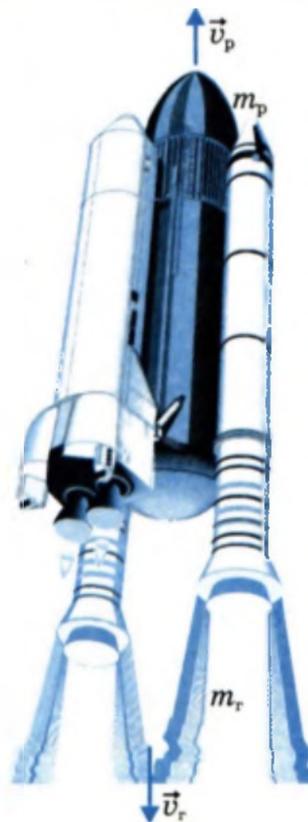


Рис. 96. Пуск ракеты.



**Опорные понятия:** реактивное движение, ракета, космонавтика.



1. Что называется реактивным движением? Объясните суть реактивного движения на основе закона сохранения импульса.
2. Объясните опыты, изображенные на рис. 92–94.
3. Расскажите об устройстве ракеты.
4. На основании каких законов ракета поднимается в космос?
5. Что вы знаете об освоении космоса, об ученых, которые внесли вклад в развитие космонавтики?

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ VI

- ◆ Слово «импульс» происходит от латинского слова *impulsus* и означает *толчок*.
- ◆ Результат взаимодействия тел связан с силой, вызвавшей это взаимодействие, и временем, в течение которого оно происходило. Поэтому вводится понятие импульса силы.
- ◆ Импульс силы равен произведению силы, действующей на тело, на время действия этой силы, т.е.:  $\vec{I} = \vec{F}t$ .
- ◆ Результат взаимодействия сил связан также с их массами и скоростью. Поэтому вводится понятие импульса тела.
- ◆ Импульс тела равен произведению массы тела на его скорость, т.е.:  $\vec{p} = m\vec{v}$ .
- ◆ Если система тел не взаимодействует с другими телами или если внешние силы взаимно уравновешиваются, то такая система тел называется замкнутой.
- ◆ Закон сохранения импульса: Сумма импульсов тел замкнутой системы сохраняется неизменной при любых движениях и любых взаимодействиях составляющих систему тел.
- ◆ Пусть две тележки с массами  $m_1$  и  $m_2$  столкнутся со скоростями  $v_1$  и  $v_2$  и после столкновения разъедутся в противоположные стороны со скоростями  $v_1'$  и  $v_2'$ . Для такой замкнутой системы тел справедливо равенство

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$$

- ◆ Если некоторая часть замкнутой системы двигается с определенной скоростью, то остальная часть этой системы начнет двигаться в противоположном направлении. Это движение называется реактивным.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ VI

1. При попытке потянуть тело за нить, к которой оно привязано, в течение  $0,05\text{ с}$  с силой  $20\text{ Н}$ , тело не сдвинулось. Когда же нить тянули в течение  $2\text{ с}$  с такой же силой, тело сдвинулось с места. Найдите импульсы силы для обоих случаев и сравните их.
2. Камень массой  $20\text{ г}$ , летящий со скоростью  $15\text{ м/с}$ , ударился о стекло, но не разбил его. Но при ударе о стекло камня массой  $100\text{ г}$ , летящего с той же скоростью, оно разбилось. Стекло разбилось также при ударе камня массой  $20\text{ г}$ , летящего со скоростью  $60\text{ м/с}$ . Вычислите и сравните импульсы тела для всех трех случаев. Почему в первом случае стекло не разбилось.
3. Камень массой  $100\text{ г}$  брошен со скоростью  $5\text{ м/с}$  в горизонтальном направлении. Каким был импульс камня в момент полета?
4. Два автомобиля с массами  $1200\text{ кг}$ , двигавшиеся навстречу друг к другу, столкнулись. Каким был импульс автомобилей при столкновении, если скорости их были равны соответственно  $90$  и  $120\text{ км/ч}$ ? Каким был бы импульс автомобилей, если бы их скорости составляли  $36$  и  $54\text{ км/ч}$  соответственно? В каком случае ущерб от столкновения будет больше и почему?
5. Шарик массой  $400\text{ г}$ , движущийся по горизонтальной поверхности со скоростью  $1\text{ м/с}$ , ударился о второй шарик и продолжил движение со скоростью  $0,4\text{ м/с}$ . Насколько изменился импульс первого шарика в момент столкновения?
6. Вагон массой  $60\text{ т}$ , двигавшийся со скоростью  $3\text{ м/с}$ , столкнулся с неподвижно стоящим вагоном массой  $40\text{ т}$ . Найдите скорость вагонов после столкновения.
7. Мальчик, масса которого равна  $40\text{ кг}$ , бежавший со скоростью  $4\text{ м/с}$ , догнал тележку массой  $20\text{ кг}$ , которая двигалась со скоростью  $1\text{ м/с}$ , и запрыгнул на нее. Чему равна скорость тележки вместе с мальчиком?



## Глава VII. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В природе существуют различные виды энергии – механическая, тепловая, электрическая, световая, ядерная, химическая и др. Энергия может переходить из одного вида в другой. Например, механическая энергия превращается в тепловую, электрическая энергия преобразуется в механическую и т.д. При этом энергия только переходит из одного вида в другой и остается неизменной по величине, т.е. энергия не возникает и не исчезает. Поэтому все процессы и явления в природе связаны друг с другом посредством энергии. В настоящей главе будем изучать работу, выполняемую при механическом движении тела, кинетическую и потенциальную энергии, превращение этих видов энергии друг в друга, сохранение полной механической энергии и мощность.

### § 39. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

#### Механическая работа и ее единицы



Рис. 97. Перемещение тела на расстояние  $s$  под действием силы  $F$ .

Если направление силы  $F$ , действующей на тело, совпадает с направлением перемещения  $s$  под действием этой силы, то говорят, что сила совершает механическую работу  $A$  (рис. 97):

$$A = Fs. \quad (1)$$



**Механическая работа равна произведению силы на путь, который прошло тело в направлении этой силы.**

В системе СИ за единицу работы принят 1 джоуль (Дж). Эта единица названа в честь английского физика *Джеймса Джоуля*.



**1 Дж – это работа силы в 1 Н по перемещению тела на расстояние 1 м.**

На практике используются производные единицы работы – мегаджоуль (1 МДж), килоджоуль (1 кДж), миллиджоуль (1 мДж), микроджоуль (1 мкДж). Производные единицы работы связаны с основной следующими зависимостями:

$$1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ мДж} = 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Так как работа совершается под действием силы, ее называют работой силы.

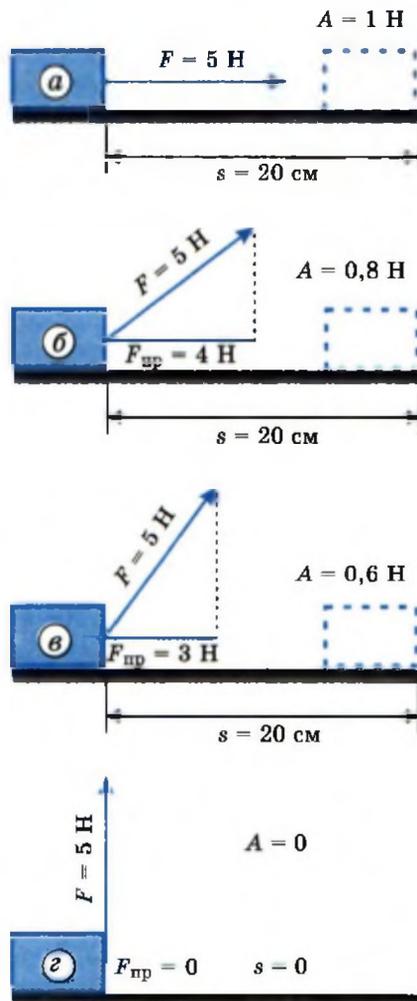
Механическая работа – скалярная величина.

### Механическая работа действующей силы

Формула (1) для механической работы, предложенная выше, верна в случае, когда направление действующей силы и направление перемещения тела совпадают. Пусть, например, тело под действием силы  $F = 5 \text{ Н}$  переместилось в направлении этой силы на расстояние  $s = 20 \text{ см}$ . В этом случае выполненная этой силой работа будет равна  $A = 5 \text{ Н} \cdot 0,2 \text{ м} = 1 \text{ Дж}$  (рис. 98, а).

Как определяется значение механической работы, если перемещение тела произошло в направлении, не совпадающем с направлением силы?

Если направление силы образует некоторый угол с направлением перемещения тела, рассматривается проекция действующей силы на направление переме-



**Рис. 98.** Зависимость выполненной работы от направления силы.

щения. Например, сила  $F = 5 \text{ Н}$ , действующая под некоторым углом так, как показано на рис. 98, б, переместила тело на расстояние 20 см. Из рисунка видно, что проекция силы  $F_{\text{пр}} = 4 \text{ Н}$ . В таком случае выполненная этой силой работа будет равна  $A = 4 \text{ Н} \cdot 0,2 \text{ м} = 0,8 \text{ Дж}$ .

С увеличением угла между направлением силы и направлением перемещения проекция  $F_{\text{пр}}$  силы  $F$  будет уменьшаться, что приведет также к уменьшению работы, выполняемой этой силой. Например, так как угол между направлением силы  $F = 5 \text{ Н}$  и направлением перемещения на рис. 98, в больше, чем угол, показанный на рис. 98, б, то его проекция  $F_{\text{пр}}$  будет меньшей и составит  $F_{\text{пр}} = 3 \text{ Н}$ . В этом случае работа, выполненная силой, будет равна  $A = 3 \text{ Н} \cdot 0,2 \text{ м} = 0,6 \text{ Дж}$ .

При дальнейшем возрастании угла между направлением силы и направлением перемещения проекция силы, а значит, и работа силы будут приближаться к нулю. Если направление силы составит угол  $90^\circ$  с направлением перемещения, то проекция силы на направление перемещения обратится в точку, т.е. станет равной нулю (рис. 98, г). Значит, если направление силы перпендикулярно направлению перемещения, то никакая работа не выполняется.

*Образец решения задачи*

Автомобиль под действием силы мотора 5 кН проехал расстояние 3 км. Какую работу выполнил мотор автомобиля?

*Дано:*  
 $F = 5 \text{ кН} = 5\,000 \text{ Н};$   
 $s = 3 \text{ км} = 3\,000 \text{ м}.$

*Формула:*  
 $A = Fs.$

*Решение:*  
 $A = 5\,000 \text{ Н} \cdot 3\,000 \text{ м} =$   
 $= 15\,000\,000 \text{ Дж} = 15 \text{ МДж}.$

*Найти:*  
 $A - ?$

*Ответ:*  $A = 15 \text{ МДж}.$



**Опорные понятия:** механическая работа, механическая работа действующей силы, проекция силы.



1. Дайте определение энергии и объясните.
2. Дайте определение механической работы и приведите ее формулу.
3. Укажите основные и производные единицы работы и связи между ними.
4. Как определяется работа, если направление силы не совпадает с направлением перемещения?
5. Чему равна механическая работа, если направление силы перпендикулярно перемещению.



1. Груз, лежащий на земле, переместили на расстояние 8 м, воздействуя на него силой 250 Н в направлении этой силы. Найдите выполненную при этом работу.
2. На тележку под определенным углом воздействовали силой, при этом она переместилась на расстояние 15 м. Какая работа выполнена, если проекция силы, действовавшей на тележку, составила 42 Н?
3. Три человека, толкая, доставили сломавшийся на дороге автомобиль в мастерскую, находящуюся в 482 м. Какую работу выполнил каждый из них, если первый толкал автомобиль с силой 150 Н, второй – с силой 200 Н, а третий – с силой 250 Н? Какую работу они выполнили все вместе?
4. Электровоз переместил железнодорожные вагоны на расстояние 2 км, выполнив при этом работу 240 МДж. С какой силой электровоз тянул вагоны?

## § 40. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

### Работа при изменении скорости тела



**Способность тела или системы тел выполнять работу называется механической энергией.**

Слово «энергия» в переводе с греческого означает *активность*. Основной единицей механической энергии, как и механической работы, является джоуль (Дж). Механическая энергия подразделяется на *кинетическую* и *потенциальную*.

Пусть тело массой  $m$ , находящееся на столе, двигаясь без трения под действием силы  $F$ , приобрело ускорение  $a$  (рис. 99). Скорость, приобретенная телом за время  $t$ , будет равна:

$$v = at. \quad (1)$$

Тогда путь, пройденный телом за это время, выразится формулой:

$$s = \frac{at^2}{2} \quad (2)$$



Рис. 99. Кинетическая энергия шарика, набравшего скорость  $v$ .

Записывая формулу (1) в виде  $t = v/a$  и подставляя ее в (2) вместо  $t$ , получаем следующее выражение для пути, пройденного телом:

$$s = \frac{v^2}{2a}. \quad (3)$$

Согласно второму закону Ньютона, сила, действующая на тело:

$$F = ma. \quad (4)$$

Пользуясь формулами (3) и (4), находим выполненную работу:

$$A = Fs = ma \cdot \frac{v^2}{2a} \quad \text{или} \quad A = \frac{mv^2}{2}. \quad (5)$$

Эта формула выражает работу, выполняемую телом массой  $m$ , чтобы из состояния покоя достичь скорости  $v$ .

Если начальная скорость тела массой  $m$  равна  $v_1$ , то для повышения его скорости на  $v_2$  нужно выполнить работу, равную:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (6)$$

### Изменение кинетической энергии

Формула (5) выражает также кинетическую энергию тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ , т.е.:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (7)$$



**Физическая величина, измеряемая половиной произведения массы тела на квадрат его скорости, называется кинетической энергией тела. Кинетическая энергия – это количественная мера движения тела.**

Если в формуле  $mv_1^2/2 = E_{k1}$  принять  $mv_2^2/2 = E_{k2}$ , работу, выполняемую телом при изменении скорости  $v_1$  на  $v_2$ , можно выразить следующим образом:

$$A = E_{k2} - E_{k1}; \quad (8)$$

здесь  $E_{k1}$  – кинетическая энергия тела при начальной скорости  $v_1$ ,  $E_{k2}$  – кинетическая энергия тела при изменении скорости на  $v_2$ . Тогда формулу (8) можно сформулировать так:

**Изменение кинетической энергии тела равно выполненной им работе***Образец решения задачи*

Чему будет равна кинетическая энергия автомобиля массой 2 т при начальной скорости 36 км/ч? А при достижении скорости 90 км/ч? Какую работу должен выполнить мотор автомобиля, чтобы достичь такого изменения скорости?

*Дано:*

$$m = 2 \text{ т} = 2000 \text{ кг};$$

$$v_1 = 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с};$$

$$v_2 = 90 \text{ км/ч} = 25 \text{ м/с}.$$

*Формула:*

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2};$$

$$E_{к2} = \frac{mv_2^2}{2};$$

$$A = E_{к2} - E_{к1}.$$

*Решение:*

$$E_{к1} = \frac{2000 \cdot 10^2}{2} \text{ Дж} = 100000 \text{ Дж} = 100 \text{ кДж};$$

$$E_{к2} = \frac{2000 \cdot 25^2}{2} \text{ Дж} = 625000 \text{ Дж} = 625 \text{ кДж};$$

$$A = (625 - 100) \text{ кДж} = 525 \text{ кДж}.$$

*Найти:*

$$E_{к1} - ? \quad E_{к2} - ? \quad A - ?$$

$$\text{Ответ: } E_{к1} = 100 \text{ кДж}; \quad E_{к2} = 625 \text{ кДж}; \quad A = 525 \text{ кДж}.$$

**Опорные понятия:** механическая энергия, кинетическая энергия.

1. Что называется механической энергией? В каких единицах она измеряется?
2. Выведите формулу (5) и объясните ее.
3. Чему равна работа, выполняемая телом заданной массы, при изменении одного значения скорости на другое?
4. Какая физическая величина называется кинетической энергией тела?
5. Какой физической величине равно изменение кинетической энергии тела?



1. Когда по шайбе массой 40 г, покоившейся на льду, ударили с силой, она приобрела скорость 25 м/с. Какой кинетической энергией стала обладать шайба?
2. Какую работу надо выполнить, чтобы остановить автомобиль массой 1,2 т, движущийся со скоростью 72 км/ч?
3. Какую работу надо выполнить, чтобы увеличить скорость велосипеда, движущегося со скоростью 10 м/с, до 20 м/с? Масса велосипеда вместе с велосипедистом равна 100 кг.
4. Какую работу должен выполнить электровоз, чтобы увеличить скорость поезда массой 200 т, движущегося со скоростью 72 км/ч, до 144 км/ч?
5. Искусственный спутник Земли, летящий со скоростью 7,7 км/с, обладает кинетической энергией 40000 МДж. Найдите массу искусственного спутника.

## § 41. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

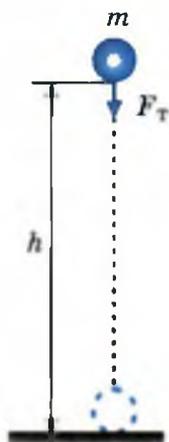


Рис. 100.  
Выполнение работы под действием силы тяжести.

Предположим, что тело массой  $m$  свободно падает с высоты  $h$  (рис. 100). При этом тело движется только под действием силы притяжения Земли, т.е. силы тяжести  $F_T = mg$ . Работа, выполняемая силой тяжести на пути падения тела с высоты  $h$ , выражается формулой:

$$A = F s = F_T h \quad \text{или} \quad A = mgh. \quad (1)$$

Эта работа равна *потенциальной энергии тела*. Значит, потенциальная энергия тела массой  $m$ , находящегося на высоте  $h$ , выражается в виде:

$$E_{\text{п}} = mgh. \quad (2)$$

Потенциальная энергия, выраженная формулой (2), связана с расположением двух взаимодействующих тел — шарика и Земли относительно друг друга.



**Энергия взаимодействующих тел или энергия, связанная с взаимным расположением частей тела, называется потенциальной энергией тела.**

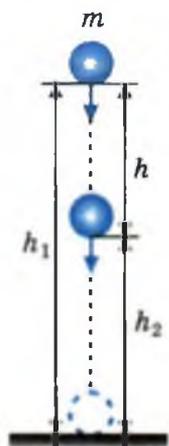


Рис. 101.  
Изменение потенциальной энергии тела.

Теперь найдем работу, выполняемую при изменении на  $h_2$  положения тела массой  $m$ , находившегося на высоте  $h_1$  (рис. 101). Так как путь, пройденный телом,  $h = h_1 - h_2$ , то работу, выполненную на этом пути, можно выразить следующим образом:

$$A = mgh = mg(h_1 - h_2) \quad \text{или} \quad A = mgh_1 - mgh_2, \quad (3)$$

где  $mgh_1 = E_{\text{п}1}$  — потенциальная энергия тела на высоте  $h_1$ ,  $mgh_2 = E_{\text{п}2}$  — потенциальная энергия тела на высоте  $h_2$ . Отсюда:

$$A = E_{\text{п}1} - E_{\text{п}2} \quad \text{или} \quad A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}), \quad (4)$$

здесь знак «минус» показывает, что с изменением положения тела от  $h_1$  до  $h_2$  потенциальная энергия тела уменьшается.

Итак:

**Изменение потенциальной энергии тела равно выполненной работе.**

Так как при падении тела с высоты вниз  $E_{п2} < E_{п1}$ ,  $A > 0$ . При этом работа силы тяжести будет положительной.

В случае поднятия тела вверх  $E_{п2} > E_{п1}$ , поэтому  $A < 0$ . При этом для преодоления силы тяжести выполняется отрицательная работа.

*Образец решения задачи*

Какой будет потенциальная энергия тела массой 1 кг на высоте 25 и 15 м? Какую работу выполнит сила тяжести при опускании тела с высоты 25 м на высоту 15 м? Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

*Дано:*

$$m = 1 \text{ кг}; h_1 = 25 \text{ м};$$

$$h_2 = 15 \text{ м}; g = 10 \text{ м/с}^2.$$

*Найти:*

$$E_{п1} - ? \quad E_{п2} - ? \quad A - ?$$

*Формула:*

$$E_{п1} = mgh_1;$$

$$E_{п2} = mgh_2;$$

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}).$$

*Решение:*

$$E_{п1} = 1 \cdot 10 \cdot 25 \text{ Дж} = 250 \text{ Дж};$$

$$E_{п2} = 1 \cdot 10 \cdot 15 \text{ Дж} = 150 \text{ Дж};$$

$$A = -(150 - 250) \text{ Дж} =$$

$$= 100 \text{ Дж}.$$

*Ответ:*  $E_{п1} = 250 \text{ Дж}$ ;  $E_{п2} = 150 \text{ Дж}$ ;  $A = 100 \text{ Дж}$ .

**Опорные понятия:** работа, выполненная силой тяжести, потенциальная энергия.

1. Какая работа выполняется при падении тела с высоты  $h$  на землю?
2. Как выражается потенциальная энергия на высоте  $h$ ?
3. Что называется потенциальной энергией?
4. Как выражается работа силы тяжести при падении тела с высоты  $h_1$  на высоту  $h_2$ ?
5. При каком вертикальном движении выполненная работа будет положительной, а при каком – отрицательной?

**У**  
**27**

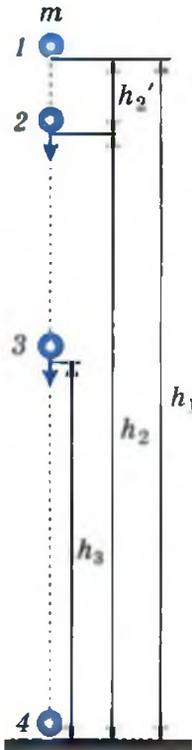
1. Какой будет потенциальная энергия тела массой 200 г на высоте 40 м? Какую работу выполнит сила тяжести тела при падении его с этой высоты на землю? В этой и следующих задачах принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Груз массой 2 кг подняли с высоты 5 м на высоту 12 м. Какой будет потенциальная энергия груза на этих высотах? Какая работа будет выполнена при поднятии груза наверх?

3. Какой будет потенциальная энергия мальчика массой 40 кг по отношению к земле, находящегося на девятом этаже здания? Примите высоту каждого этажа равной 3 м.



На основе опытов и данных, приведенных в темах “Механическая работа” и “Потенциальная энергия”, проводится лабораторная работа на тему: “Измерение работы, выполняемой при поднятии тела на высоту и горизонтальном перемещении его на такое же расстояние”.

## § 42. ПРЕВРАЩЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЙ



Рассмотрим, как изменяются потенциальная и кинетическая энергии тела массой  $m = 1$  кг, брошенного с высоты  $h = 45$  м (рис. 102). Примем ускорение свободного падения равным  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

*1-й случай.* На высоте  $h_1 = 45$  м потенциальная и кинетическая энергии тела выражаются следующим образом:

$$E_{п1} = mgh_1; \quad E_{п1} = 1 \cdot 10 \cdot 45 \text{ Дж} = 450 \text{ Дж};$$

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2}; \quad E_{к1} = \frac{1 \cdot 0^2}{2} \text{ Дж} = 0.$$



Для тела, находящегося в состоянии покоя на высоте  $h$  над землей, потенциальная энергия будет максимальной, а кинетическая энергия будет равна нулю.

*2-й случай.* За время  $t = 1$  с свободно падающее с высоты тело пройдет путь  $h_2' = gt^2/2 = 10 \cdot 1^2/2$  м = 5 м, и в этот момент будет находиться над землей на высоте  $h_2 = h - h_2' = 45$  м - 5 м = 40 м. При этом скорость тела достигнет значения  $v_2 = gt_2 = 10 \cdot 1$  м/с = 10 м/с. В этом случае для тела, свободно падающего с высоты  $h = 45$  м, на высоте  $h_2 = 40$  м потенциальная и кинетическая энергии будут следующими:

$$E_{п2} = mgh_2; \quad E_{п2} = 1 \cdot 10 \cdot 40 \text{ Дж} = 400 \text{ Дж};$$

$$E_{к2} = \frac{mv_2^2}{2}; \quad E_{к2} = \frac{1 \cdot 10^2}{2} \text{ Дж} = 50 \text{ Дж}.$$

Рис. 102.  
Превращение энергии при свободном падении тела.

**3-й случай.** Тело, брошенное с высоты  $h_1 = 45$  м, в течение 2 с пройдет путь 20 м и будет находиться над землей на высоте  $h_3 = 25$  м, при этом оно приобретет скорость  $v_3 = 20$  м/с. В этот момент потенциальная и кинетическая энергии тела будут следующими:

$$E_{п3} = mgh_3; \quad E_{п3} = 1 \cdot 10 \cdot 25 \text{ Дж} = 250 \text{ Дж};$$

$$E_{к3} = \frac{mv_3^2}{2}; \quad E_{к3} = \frac{1 \cdot 20^2}{2} \text{ Дж} = 200 \text{ Дж}.$$



**В момент падения тела на землю с высоты  $h$  его потенциальная энергия будет уменьшаться, а кинетическая энергия будет увеличиваться, т.е. потенциальная энергия тела превращается в кинетическую.**

**4-й случай.** В момент времени 3 с тело, брошенное с высоты  $h_1 = 45$  м, упадет на землю, т.е.  $h_4 = 0$ . Скорость тела в этот момент достигнет  $v_4 = 30$  м/с. В момент падения на землю потенциальная и кинетическая энергии тела будут следующими:

$$E_{п4} = mgh_4; \quad E_{п4} = 1 \cdot 10 \cdot 0 \text{ Дж} = 0;$$

$$E_{к4} = \frac{mv_4^2}{2}; \quad E_{к4} = \frac{1 \cdot 30^2}{2} \text{ Дж} = 450 \text{ Дж}.$$



**Для тела, свободно падающего с высоты, в момент падения его потенциальная энергия будет равна нулю, а кинетическая энергия будет максимальной.**

При подбрасывании тела вертикально вверх наблюдается обратный процесс. По мере поднятия вверх кинетическая энергия тела уменьшается от максимального значения до нуля, а потенциальная – возрастает от нуля до максимального значения.

Изменение потенциальной энергии происходит не только при вертикальном движении тела, но и при произвольной траектории его движения. Например, пусть на седьмом этаже здания находится тело массой 2 кг. Если принять высоту каждого этажа равной 3 м, то потенциальная энергия тела, находящегося на седьмом этаже, по отношению к земле, т.е. к первому этажу будет равна 360 Дж. Если же тело спустить на третий этаж по лестнице или на лифте, независимо от этого его потенциальная энергия на третьем этаже будет равна 120 Дж.

*Образец решения задачи*

Тело массой 200 г подброшено вертикально вверх со скоростью 15 м/с. Какой будет через 1 с кинетическая энергия тела и его потенциальная энергия по отношению к точке подбрасывания? Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

*Дано:*  
 $m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг};$   
 $v_0 = 15 \text{ м/с};$   
 $g = 10 \text{ м/с}^2.$

*Формула:*

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 - at; \\ E_k &= \frac{mv^2}{2}; \\ h &= v_0t - \frac{gt^2}{2}; \\ E_n &= mgh. \end{aligned} \right\}$$

*Решение:*

$$\left. \begin{aligned} v &= 15 \text{ м/с} - 10 \cdot 1 \text{ м/с} = 5 \text{ м/с}; \\ E_k &= \frac{0,2 \cdot 5^2}{2} \text{ Дж} = 2,5 \text{ Дж}; \\ h &= 15 \cdot 1 \text{ м} - \frac{10 \cdot 1^2}{2} \text{ м} = 10 \text{ м}; \\ E_n &= 0,2 \cdot 10 \cdot 10 \text{ Дж} = 20 \text{ Дж}. \end{aligned} \right\}$$

*Найти:*  
 $E_k - ?$   $E_n - ?$

*Ответ:*  $E_k = 2,5 \text{ Дж}; E_n = 20 \text{ Дж}.$



**Опорные понятия:** превращение потенциальной и кинетической энергий тела.



1. Вычислите и объясните, на какой высоте окажется тело (из рис. 102), брошенное на землю, через 1, 2 и 3 с?
2. Каково значение потенциальной энергии тела, находящегося на определенной высоте? А кинетической энергии?
3. Как изменяются потенциальная и кинетическая энергии тела, свободно падающего с высоты?
4. Какое значение имеет кинетическая энергия свободно падающего с высоты тела в момент его падения на землю? А потенциальная энергия?



1. Тело массой 200 г брошено с высоты 125 м. Чему будут равны потенциальная и кинетическая энергии тела через 1 и 5 с движения? В этой и следующих задачах принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Тело массой 100 г подброшено вертикально вверх со скоростью 30 м/с. Чему будут равны кинетическая и потенциальная энергии тела через 2 с? Какую потенциальную энергию будет иметь тело на максимальной высоте?
3. Кинетическая энергия молота копра, падающего с высоты 6 м, в момент забивания сваи составляет 18 кДж. Чему равна потенциальная энергия молота на этой высоте по отношению к свае? А кинетическая энергия? Чему равна масса молота?

## § 43. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Сумма кинетической и потенциальной энергий, т.е. полная механическая энергия тела, падающего с высоты  $h = 45$  м (см. рис. 102), в каждом из рассмотренных выше случаев будет равна:

$$\text{в 1-м случае: } E_{п1} + E_{к1} = 450 \text{ Дж} + 0 = 450 \text{ Дж.}$$

$$\text{во 2-м случае: } E_{п2} + E_{к2} = 400 \text{ Дж} + 50 \text{ Дж} = 450 \text{ Дж.}$$

$$\text{в 3-м случае: } E_{п3} + E_{к3} = 250 \text{ Дж} + 200 \text{ Дж} = 450 \text{ Дж.}$$

$$\text{в 4-м случае: } E_{п4} + E_{к4} = 0 + 450 \text{ Дж} = 450 \text{ Дж.}$$

Отсюда можно сделать следующий вывод:

 Сумма кинетической и потенциальной энергий, то есть полная механическая энергия тела, свободно падающего с высоты, в любой момент времени остается неизменной.

Этот вывод справедлив и для случаев, когда тело подбрасывают вертикально вверх.

Известно, что изменение кинетической энергии тела равно выполненной работе. Если кинетическая энергия падающего с высоты тела для 1-го случая  $E_{к1}$ , а для 2-го случая —  $E_{к2}$ , то выполненная работа будет:

$$A = E_{к2} - E_{к1}. \quad (1)$$

Изменение потенциальной энергии тела для этих двух случаев также будет равно выполненной работе, т.е.

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}). \quad (2)$$

Так как выражения (1) и (2) равны между собой, их можно объединить:

$$E_{к2} - E_{к1} = -(E_{п2} - E_{п1}). \quad (3)$$

Из этого равенства следует, что в результате взаимодействия и движения тел кинетическая и потенциальная энергии изменяются таким образом, что уменьшение одной из них равно увеличению другой. На сколько уменьшается одна, на столько же увеличивается другая.

Равенство (3) можно переписать в следующем виде:

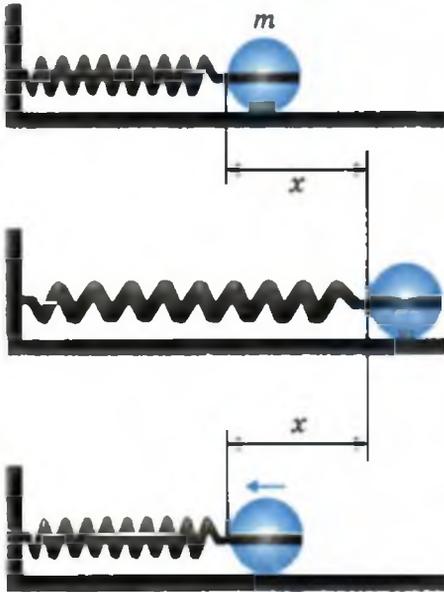
$$E_{к1} + E_{п1} = E_{к2} + E_{п2}. \quad (4)$$

Левая сторона этого равенства выражает полную механическую энергию тела в 1-м случае, а правая — во 2-м случае. Равенство (4) выражает

**закон сохранения механической энергии.** Этот закон формулируется следующим образом:



**Полная механическая энергия замкнутой системы остается неизменной при любых движениях ее частей.**



**Рис. 103.** Сохранение механической энергии в замкнутой системе, состоящей из пружины и тела.

Выше мы рассмотрели движение тела под действием силы притяжения Земли, т.е. механическое движение в замкнутой системе, состоящей из Земли и тела. Закон сохранения механической энергии справедлив и для других замкнутых систем. Рассмотрим, например, замкнутую систему, состоящую из опоры, пружины и тела.

К пружине, установленной на опору, прикрепим тело массой  $m$  и растянем ее на расстояние  $x$  (рис. 103). При этом кинетическая энергия тела будет равна  $E_{к1} = mv_1^2/2 = 0$ , а потенциальная энергия  $E_{п1} = kx^2/2$ , где  $x$  – жесткость пружины. Отпустим пружину, при этом тело наберет скорость под действием силы упругости пружины. При выходе тела из равновесного состояния, т.е. на расстоянии  $x = 0$ , его скорость достигнет максимального значения.

В соответствии с этим кинетическая энергия  $E_{к2} = mv_2^2/2$  тела также будет максимальной.

Для данной замкнутой системы, состоящей из пружины и тела, так же справедлива формула (4), т.е. закон сохранения механической энергии.

При рассмотрении движения тела под действием силы упругости пружины было принято, что тело движется по поверхности опоры без трения.

*Образец решения задачи*

Тело массой 1 кг свободно падает с высоты 80 м. Чему равны кинетическая и потенциальная энергии тела в момент, когда оно преодолело половину высоты? Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Дано:	Формула:	Решение:
$h_1 = 80 \text{ м};$	$E_{п1} = mgh_1;$	$E_{п1} = 1 \cdot 10 \cdot 80 \text{ Дж} = 800 \text{ Дж};$
$h_2 = \frac{h_1}{2};$	$E_{п2} = mgh_2;$ в равенстве	$h_2 = \frac{80}{2} \text{ м} = 40 \text{ м};$
$g = 10 \text{ м/с}^2.$	$E_{к1} + E_{п1} = E_{к2} + E_{п2}$	$E_{п2} = 1 \cdot 10 \cdot 40 \text{ Дж} = 400 \text{ Дж};$
<b>Найти:</b>	$E_{к1} = 0;$	$E_{к2} = 800 \text{ Дж} - 400 \text{ Дж} = 400 \text{ Дж}.$
$E_{п2} - ? \quad E_{к2} - ?$	$E_{к2} = E_{п1} - E_{п2}.$	

**Ответ:**  $E_{п2} = 400 \text{ Дж}; E_{к2} = 400 \text{ Дж}.$



**Опорные понятия:** полная механическая энергия, закон сохранения механической энергии.



1. Объясните, почему сохраняется полная механическая энергия тела, брошенного вниз с высоты.
2. Как выражается и формулируется закон сохранения механической энергии?
3. Объясните сохранение механической энергии в замкнутой системе, состоящей из пружины и тела.



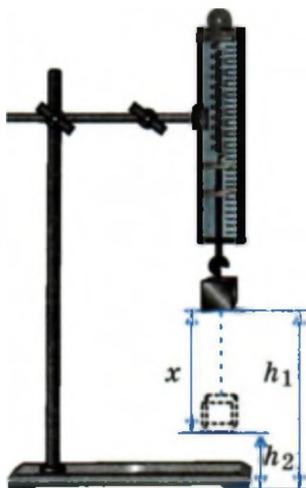
1. Тело массой 200 г подброшено вертикально вверх со скоростью 30 м/с. Какой будет потенциальная энергия тела при достижении максимальной высоты?
2. Полная механическая энергия тела массой 500 г, брошенного с высоты, равна 200 Дж. С какой высоты брошено тело? Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
3. Определите полную механическую энергию замкнутой системы, изображенной на рис. 103, если масса тела равна 50 г, а максимальная скорость, которую оно набирает после отпускания растянутой на 10 см пружины, равна 10 м/с. Какова жесткость пружины?

## § 44. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

(Лабораторная работа 4)

**Цель работы:** изучение изменения потенциальной энергии и сохранения полной механической энергии пружины и тела при движении пружины под действием силы тяжести подвешенного к ней тела.

**Необходимые принадлежности:** штатив, динамометр с жесткостью пружины 40–100 Н/м, измерительная линейка, набор грузов.



**Рис. 104.** Изменение потенциальной энергии пружины и груза.

### Порядок выполнения работы

1. Соберите установку, показанную на рис. 104.
2. Подберите такой груз, чтобы при подвешивании его на пружину она растянулась примерно на 5–10 см.
3. Подвесьте подобранный груз на пружину динамометра и поддержите его так, чтобы пружина не растянулась. Потенциальная энергия груза будет  $E'_{п1} = 0$ . В этом положении измерьте высоту  $h_1$ . Результаты измерения запишите в таблицу.
4. Медленно отпустите груз. Измерьте высоту  $h_2$  в растянутом состоянии пружины.
5. По формуле  $x = h_1 - h_2$  вычислите расстояние  $x$ , на которое растянулась пружина.
6. С помощью формул  $E_{п1} = mgh_1$  и  $E_{п2} = mgh_2$  вычислите значения потенциальной энергии груза на высоте  $h_1$  и  $h_2$ .
7. С помощью формулы  $E'_{п2} = kx^2/2$  найдите потенциальную энергию растянутой пружины (зная ее жесткость).
8. Вычислите суммы  $E_{п1} + E'_{п1}$  и  $E_{п2} + E'_{п2}$ .
9. Обратите внимание на справедливость равенства  $E_{п1} + E'_{п1} = E_{п2} + E'_{п2}$ , т.е. на то, как выполняется закон сохранения механической энергии. Чем ближе будут друг к другу значения правой и левой сторон равенства, тем точнее будут результаты опыта.
10. Повторите опыт три раза с грузами различной массы.

Таблица

№	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$x$ , м	$E_{п1}$ , Дж	$E_{п2}$ , Дж	$E'_{п2}$ , Дж	$E_{п1} + E'_{п1}$ , Дж	$E_{п2} + E'_{п2}$ , Дж
1								
2								
3								



1. Какая связь существует между работой силы упругости и потенциальной энергией?
2. О чем свидетельствует в проведенном опыте выполнение равенства  $E_{п1} + E'_{п1} = E_{п2} + E'_{п2}$ ?
3. На сколько увеличилась потенциальная энергия пружины при подвешивании к ней груза?
4. На сколько уменьшилась потенциальная энергия груза при подвешивании к пружине?
5. На основе результатов опыта сделайте выводы.

## § 45. МОЩНОСТЬ

### Мощность и ее единицы

Различные механизмы и машины выполняют одну и ту же работу за разное время. Например, если большой кран поднимает с земли на высоту 30 м 10 т кирпича за 1 мин, то маленький кран поднимет это же количество кирпича по 2 т за пять раз. При этом оба крана выполняют одну и ту же работу, но затратят на ее выполнение разное время.

Для сравнения способности машины, двигателя и разного рода механизмов выполнять определенную работу вводится физическая величина, называемая *мощностью*. Чем быстрее выполнит одну и ту же работу одна из сравниваемых машин, тем большей будет ее мощность  $N$ . Мощность  $N$  механизма равна объему работы, выполняемой за единицу времени:

$$N = \frac{A}{t}. \quad (1)$$



**Работа, выполняемая за единицу времени, называется *мощностью*.**

В системе СИ за единицу мощности принят *ватт* (Вт). 1 Вт – это такая мощность, при которой за 1 с выполняется работа, равная 1 Дж. Эта единица названа в честь изобретателя паровой машины английского физика и инженера Джеймса Уатта.

На практике наряду с основной единицей применяются производные единицы мощности – милливатт (мВт), гектоватт (гВт), киловатт (кВт), мегаватт (МВт). Основная и производные единицы мощности связаны между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} 1 \text{ мВт} &= 0,001 \text{ Вт} = 10^{-3} \text{ Вт}, & 1 \text{ гВт} &= 100 \text{ Вт} = 10^2 \text{ Вт}, \\ 1 \text{ кВт} &= 1\,000 \text{ Вт} = 10^3 \text{ Вт}, & 1 \text{ МВт} &= 1\,000\,000 \text{ Вт} = 10^6 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Из формулы мощности можно найти работу, выполненную за определенное время:

$$A = Nt. \quad (2)$$

Эта формула дает возможность ввести еще одну единицу работы и энергии. За единицу механической работы можно принять работу, которую выполняет механизм мощностью 1 Вт за 1 с. Эта единица называется *ватт-секунда* (Вт·с). На практике используются также единицы работы и энергии киловатт·час (кВт·ч) и мегаватт·час (МВт·ч). Между основной и этими единицами работы и энергии имеют место следующие соотношения:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}; \quad 1 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

### Связь между мощностью, силой и скоростью

Транспортные средства часто движутся с постоянной скоростью. Автомобиль, движущийся равномерно и прямолинейно с постоянной скоростью  $v$ , в течение времени  $t$  проходит путь  $s = vt$ . Движение автомобиля с постоянной скоростью обеспечивается работой силы  $F$  его мотора. Эта сила равна по величине силам сопротивления движению автомобиля (всевозможным силам трения) и направлена противоположно. Поэтому работа силы мотора  $F$  на пути  $s$  определяется равенством  $A = Fs = Fvt$ . Учитывая, что  $A = Nt$ , получаем следующую формулу мощности:

$$N = Fv. \quad (3)$$

Из этой формулы видно, что чем большей будет мощность мотора, тем большую скорость будет иметь автомобиль. Поэтому на движущихся с большой скоростью самолетах, поездах и автомобилях устанавливают моторы большой мощности. Из этой же формулы можно сделать вывод, что чем большей будет скорость при постоянной мощности мотора, тем меньшей будет сила. Поэтому при движении автомобиля по дороге, ведущей вверх, для увеличения силы тяги мотора приходится снижать скорость.

#### *Образец решения задачи*

Большой кран поднял 10 т кирпича на высоту 30 м за 1 мин, а маленький кран на эту же высоту за 1 мин поднял 2 т кирпича. Найдите полезную мощность каждого из кранов. Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Дано:	Формула:	Решение:
$m_1 = 10 \text{ т} = 10\,000 \text{ кг};$	$A_1 = m_1gh;$	$A_1 = (10\,000 \cdot 10 \cdot 30) \text{ Дж} = 3\,000\,000 \text{ Дж};$
$m_2 = 2 \text{ т} = 2\,000 \text{ кг};$	$A_2 = m_2gh;$	$A_2 = (2\,000 \cdot 10 \cdot 30) \text{ Дж} = 600\,000 \text{ Дж};$
$h = 30 \text{ м};$	$N_1 = \frac{A_1}{t};$	$N_1 = \frac{3\,000\,000}{60} \text{ Вт} = 50\,000 \text{ Вт} = 50 \text{ кВт};$
$t = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с};$	$N_2 = \frac{A_2}{t};$	$N_2 = \frac{600\,000}{60} \text{ Вт} = 10\,000 \text{ Вт} = 10 \text{ кВт}.$
$g = 10 \text{ м/с}^2.$		
<b>Найти:</b>		<b>Ответ:</b> $N_1 = 50 \text{ кВт}; N_2 = 10 \text{ кВт}.$
$N_1 - ? \quad N_2 - ?$		



**Опорное понятие:** мощность.



1. Что называется мощностью? В каких единицах она измеряется?
2. Как выражается связь между мощностью, силой и скоростью?
3. В каких еще единицах, кроме джоуля, измеряются работа и энергия?
4. Что нужно сделать водителю автомобиля, чтобы увеличить на подъеме силу тяги мотора?



1. Найдите полезную мощность ребенка, который выполнил за 1 ч работу 360 кДж.
2. Под действием некоторой силы тело массой 4 кг прошло в течение 1 мин по горизонтальной поверхности расстояние 15 м. Коэффициент трения скольжения равен 0,2. Найдите полезную мощность тела при движении. В этой и следующих задачах примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
3. Лошадь перевезла за 10 мин телегу массой 1 т на расстояние 1 км. Найдите полезную мощность лошади, если коэффициент трения, препятствующий движению, равен 0,06.
4. Самолет летит прямолинейно и равномерно со скоростью 900 км/ч. Чему равна сила тяги мотора самолета, если его полезная мощность составляет 1,8 МВт?

## § 46. СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ПРИРОДЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

### Преобразование и сохранение энергии в природе

Закон сохранения энергии справедлив не только для механических явлений, но и для прочих физических явлений. В этих явлениях энергия

может переходить из одного вида в другой. Например, под действием силы трения часть механической энергии движущегося тела превращается в тепловую.

Лучистая энергия Солнца преобразуется в тепловую, благодаря ей согревается поверхность Земли, происходят тепловые процессы в атмосфере, выпадают осадки, которые пополняют запасы воды в реках, потенциальная энергия воды при падении вниз с высоких плотин превращается в кинетическую, кинетическая энергия воды вращает турбины электростанций и появляется электрическая энергия, которая с помощью электрических ламп превращается в световую и так далее.

Энергия в природе не исчезает, она только переходит из одного вида в другой. Это – закон сохранения энергии. Закон сохранения энергии в природе формулируется следующим образом:



**В природе энергия никогда не возникает и не исчезает, она только превращается из одного вида в другой или переходит от одного тела к другому, оставаясь неизменной по величине.**

### Коэффициент полезного действия механизмов

Полезная работа любой машины или двигателя всегда меньше полностью израсходованной энергии, так как при использовании любой машины происходят превращения энергии, которые называются потерями энергии. Например, часть энергии теряется на преодоление сил трения, в результате чего машина нагревается. И только оставшаяся энергия расходуется на полезную работу.

Для характеристики того, какая часть используемой энергии дает полезную работу, вводится коэффициент полезного действия (сокращенно КПД).



**Величина, измеряемая отношением полезной работы к полностью выполненной, называется коэффициентом полезного действия, который обозначается буквой  $\eta$ .**

Коэффициент полезного действия любого механизма обычно выражают в процентах. Обозначив полезную работу  $A_{\text{полезн}}$ , полностью затраченную работу –  $A_{\text{затрач}}$ , запишем следующую формулу КПД:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн.}}}{A_{\text{полн.}}} \cdot 100\%.$$

Так как в машинах и двигателях энергия теряется на преодоление сил трения, КПД всегда меньше 1 или 100%.

*Образец решения задачи*

Мощность двигателя подъемного крана 10 кВт. Кран поднимает груз массой 5 000 кг на высоту 27 м за 3 мин. Найдите КПД крана. Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

*Дано:*

$$\begin{aligned} N_{\text{дв}} &= 10 \text{ кВт} = 10\,000 \text{ Вт}; \\ m &= 5\,000 \text{ кг}; \quad h = 27 \text{ м}; \\ t &= 3 \text{ мин} = 180 \text{ с}; \\ g &= 10 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

*Найти:*

$$\eta - ?$$

*Формула:*

$$\begin{aligned} A_{\text{полн.}} &= N_{\text{дв}} t; \\ A_{\text{полезн.}} &= mgh; \\ \eta &= \frac{A_{\text{полезн.}}}{A_{\text{полн.}}} \cdot 100\%. \end{aligned}$$

*Решение:*

$$\begin{aligned} A_{\text{полн.}} &= (10\,000 \cdot 180) \text{ Дж} = \\ &= 1\,800\,000 \text{ Дж}. \\ A_{\text{полезн.}} &= (5\,000 \cdot 10 \cdot 27) \text{ Дж} = \\ &= 1\,350\,000 \text{ Дж}. \\ \eta &= \frac{1\,350\,000}{1\,800\,000} \cdot 100\% = 75\%. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $\eta = 75\%$ .



**Опорные понятия:** превращение энергии в природе, сохранение энергии в природе, лучистая энергия Солнца, гидроэлектростанция, коэффициент полезного действия.



1. Объясните, что значит сохранение энергии в природе.
2. Что вы понимаете под словами: «Энергия не возникает и не исчезает»?
3. Что называется коэффициентом полезного действия и как он выражается?
4. Почему КПД всегда меньше 1?



1. На автомобиле установлен двигатель мощностью 100 кВт. За 1 мин он выполняет полезную работу 2,4 МДж. Найдите КПД автомобиля.
2. Подъемный кран имеет мощность 10 кВт. КПД двигателя 80%. За какое время он поднимет на 40 м груз массой 2 т? Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
3. Самолет летит прямолинейно и равномерно со скоростью 900 км/ч. Мощность двигателя 1,8 МВт, КПД – 70%. Найдите силу тяги самолета.

4. Через плотину гидроэлектростанции высотой 25 м каждую секунду переливается 200 т воды. Мощность электростанции 10 МВт. Каков КПД превращения энергии падающей воды в электрическую энергию? Примите  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ VII

- ◆ Если под действием силы  $F$  тело перемещается на расстояние  $s$ , то совершается работа  $A$ . При этом выполненная работа равна произведению этой силы на путь, который прошло тело в направлении этой силы, т.е.  $A = Fs$ .
- ◆ Кинетическая энергия – это количественная мера. Кинетическая энергия тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ , равна:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .
- ◆ Изменение кинетической энергии тела равно выполненной им работе:  $A = E_{k2} - E_{k1}$ .
- ◆ Потенциальная энергия – это энергия взаимодействующих тел или энергия, связанная с взаимным расположением частей тела. Потенциальная энергия тела массой  $m$  на высоте  $h$  от поверхности земли равна:  $E_p = mgh$ .
- ◆ Изменение потенциальной энергии тела равно выполненной им работе:  $A = -(E_{p2} - E_{p1})$ .
- ◆ Потенциальная энергия свободно падающего тела уменьшается, а кинетическая энергия возрастает, т.е. потенциальная энергия тела превращается в кинетическую.
- ◆ Сумма кинетической и потенциальной энергий, т.е. полная механическая энергия тела, свободно падающего с высоты, в любой момент времени остается неизменной, т.е.:  $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$ .
- ◆ Закон сохранения энергии: Полная механическая энергия замкнутой системы остается неизменной при любых движениях ее частей.
- ◆ Мощность – это работа, выполненная за единицу времени:  $N = \frac{A}{t}$ .
- ◆ Коэффициент полезного действия механизма равен отношению полезной работы к полностью выполненной работе:  $\eta = \frac{A_{\text{полезн.}}}{A_{\text{полн.}}} \cdot 100\%$ .

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УПРАЖНЕНИЯ ПО ГЛАВЕ VII**

1. Какую работу выполняет сила тяжести при падении тела массой 1 кг с высоты 50 м на высоту 20 м? В данном и последующих упражнениях принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
2. Пружина, жесткость которой равна 10 000 Н/м, из равновесного состояния вытянулась на 8 см. Чему равна при этом потенциальная энергия пружины?
3. Для того чтобы растянуть пружину на 5 мм, нужно совершить работу в 3 кДж. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть пружину на 1,2 см?
4. Тело массой 1 кг свободно падает с высоты 180 м. Какими будут потенциальная и кинетическая энергии тела в конце шестой секунды движения?
5. Какую работу выполняет штангист при поднятии штанги массой 180 кг на 2 м?
6. Какую работу выполняет кран при поднятии стальной балки длиной 7 м и сечением  $72 \text{ см}^2$  из горизонтального положения на высоту 60 м. Плотность стали  $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .
7. Скорость свободно падающего тела массой 250 г на определенном отрезке пути возросла с 1 до 9 м/с. Найдите работу силы тяжести на этом пути.
8. Импульс тела, движущегося с определенной скоростью, равен  $10 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ , а кинетическая энергия 50 Дж. Найдите скорость и массу тела.
9. Столб массой 40 кг и длиной 3 м лежит на земле. Какую работу нужно выполнить, чтобы поставить столб вертикально.
10. Тело массой 0,5 кг свободно падает с высоты 60 м. Найдите потенциальную и кинетическую энергии тела на высоте 20 м от земли.
11. Камень брошен вверх со скоростью 20 м/с. На какой высоте потенциальная и кинетическая энергии камня сравняются?
12. Тело равномерно движется по горизонтальной поверхности под действием силы 100 Н. После прекращения воздействия внешней силы тело проскользило на 2 м и остановилось. Найдите работу силы трения.
13. Найдите полезную мощность мальчика, выполнившего работу в 180 кДж за 0,5 ч.
14. На автомобиль установлен двигатель мощностью 250 кВт, который за 1 ч выполнил полезную работу в 360 МДж. Найдите КПД двигателя.

ОТВЕТЫ УПРАЖНЕНИЙ

Упр. 2. 3.  $v = 1,5$  м/с. 4.  $v = 5$  м/с. 5.  $v = 80$  км/ч. Упр. 3. 1.  $s = 60$  м. 2.  $s = 30$  км. 3.  $t = 10$  мин. 4.  $t = 0,5$  ч. Упр. 4. 1.  $v_{ср} = 0,5$  м/с. 2.  $v_{ср} = 90$  км/ч. 3.  $v = 1,5$  м/с. 4. В 7 ч 40 мин. Упр. 5. 1.  $a = 2,5$  м/с<sup>2</sup>. 2.  $a_1 = 0,5$  м/с<sup>2</sup>;  $a_2 = -1,0$  м/с<sup>2</sup>. 3.  $a = 0,5$  м/с<sup>2</sup>. 4.  $t = 30$  с. 5.  $t = 50$  с. Упр. 6. 1.  $v = 12$  м/с. 2.  $v = 15$  м/с. 3.  $v = 24$  км/ч;  $v_{ср} = 42$  км/ч. 4.  $v_0 = 5$  м/с. Упр. 7. 1.  $s = 15$  м. 2.  $s = 1,4$  км. Упр. 8. 1.  $v = 60$  м/с;  $h = 180$  м. 2.  $t = 4$  с;  $h = 80$  м. 3.  $v = 45$  м/с;  $h = 45$  м. Упр. 9. 1.  $v = 5$  м/с;  $h = 30$  м. 2.  $h = 45$  м;  $t = 6$  с. 3.  $v = -10$  м/с;  $h = 75$  м. Упр. 10. 1.  $v_1 = 0,5$  м/с;  $v_2 = 1$  м/с;  $v_3 = 1,5$  м/с;  $\omega = 10$  рад/с. 2.  $v = 10$  м/с. 3.  $v = 0,05$  мм/с;  $\Delta\varphi = 1$  рад;  $\omega = 0,0017$  рад/с. 5.  $v = 2,1$  см/с;  $\omega = 0,0021$  рад/с. Упр. 11. 1.  $v \approx 0,21$  см/с;  $\omega \approx 0,21$  рад/с. 2.  $T = 0,05$  с;  $v = 20$  л/с;  $\omega = 125,6$  рад/с. 3.  $T \approx 0,19$  с;  $v \approx 5,3$  л/с;  $\omega = 33,3$  рад/с. 4.  $T = 0,25$  с;  $v = 6,28$  м/с;  $\omega = 25,12$  рад/с. 5.  $v \approx 465$  м/с;  $\omega \approx 7,3 \cdot 10^{-5}$  рад/с. Упр. 12. 1.  $a = 100$  м/с<sup>2</sup>. 2.  $a \approx 1786$  м/с<sup>2</sup>. 3.  $a \approx 1893$  м/с<sup>2</sup>. 4.  $R = 57,6$  см. 5.  $T = 0,05$  с;  $v = 18,84$  м/с;  $\omega = 125,6$  рад/с;  $a \approx 2366$  м/с<sup>2</sup>. Упр. 13. 1.  $a_1 = 0,1$  м/с<sup>2</sup>;  $a_2 = 0,2$  м/с<sup>2</sup>;  $a_3 = 0,3$  м/с<sup>2</sup>. 2.  $a_1 = 0,1$  м/с<sup>2</sup>;  $a_2 = 0,05$  м/с<sup>2</sup>;  $a_3 \approx 0,033$  м/с<sup>2</sup>. 3.  $F = 0,5$  Н. 4.  $m = 0,5$  кг. Упр. 14. 2.  $F_2 = F_1 = 40$  Н;  $a_1 = 0,8$  м/с<sup>2</sup>;  $a_2 = 0,7$  м/с<sup>2</sup>;  $v_1 > v_2$ . 3.  $a = 2$  м/с<sup>2</sup>;  $m = 40$  кг. 4.  $F = 20$  Н. Упр. 15. 1.  $v = 7,85$  м/с;  $F \approx 4,9$  Н. 2. А.  $v = 7,85$  м/с;  $F \approx 9,8$  Н. Б.  $v = 15,7$  м/с;  $F = 9,8$  Н. В.  $v = 3,925$  м/с;  $F = 1,2$  Н. 3.  $m = 200$  кг;  $a = 12,5$  м/с<sup>2</sup>. Упр. 16. 1.  $k = 80$  Н/м. 2.  $\Delta l = 2$  см. 3.  $F_{вн} = 40$  Н. 4.  $\Delta l = 1$  см. 5.  $k = 4 \cdot 10^5$  Н/м. 6.  $k_2 = 200$  Н/м. Упр. 17. 1.  $F \approx 2 \cdot 10^{20}$  Н. 2.  $F \approx 1,7 \cdot 10^{-7}$  Н. 3.  $F \approx 6,7 \cdot 10^{-3}$  Н. Упр. 18. 1.  $F = F_T = 2$  кН. 3.  $m = 2$  т. Упр. 19. 1.  $P = 0,5$  Н. 2.  $P = 0,8$  Н. 3.  $P = F_{упр.} = 2$  Н. Упр. 20. 1.  $P = 6$  Н. 2.  $a = 3$  м/с<sup>2</sup>. 3.  $P = 2$  Н. 4.  $P = 0$ . Упр. 21. 1.  $h = 45$  м;  $s = 24$  м. 2.  $t = 5$  с;  $h = 125$  м. 3.  $v_1/v_a = 355,5$ ;  $v_1/v_c = 31,6$ . Упр. 22. 1.  $F_{тр(с)} = 20$  Н. 2.  $F = 12$  Н. 3.  $F_{тр(к)} = 0,06$  Н. 4.  $F_{тр(с)} = 3,6$  Н;  $F_{тр(с)}/F_{тр(к)} = 60$ . Упр. 23. 1.  $I_1 = 20$  Н·с,  $I_2 = 1$  Н·с. 2.  $p_1 = 0,1$  кг·м/с;  $p_2 = 1$  кг·м/с;  $p_3 = 6$  кг·м/с. 3.  $I = 10$  Н·с. 4.  $I = 0,03$  Н·с. Упр. 24. 1.  $m_2 = 30$  т. 2.  $v'_1 = v'_2 = 4,5$  м/с. 3.  $v'_2 = 4$  м/с. Упр. 25. 1.  $A = 2$  кДж. 2.  $A_1 = 72$  кДж;  $A_2 = 96$  кДж;  $A_3 = 120$  кДж;  $A = 288$  кДж. 3.  $F = 120$  кН. Упр. 26. 1.  $E_k = 12,5$  Дж. 2.  $A = 240$  кДж. 3.  $A = 15$  кДж. 4.  $A = -120$  МДж. 5.  $m = 1350$  кг. Упр. 27. 1.  $E_{п} = 80$  кДж. 2.  $E_{п1} = 100$  Дж;  $E_{п2} = 240$  Дж;  $A = -140$  Дж. 3.  $A = 9,6$  кДж. Упр. 28. 1.  $E_{к1} = 90$  Дж;  $E_{п1} = 160$  Дж;  $E_{к2} = 250$  Дж;  $E_{п2} = 0$ . 2.  $E_{к1} = 5$  Дж;  $E_{п1} = 40$  Дж;  $E_{п2} = 45$  Дж. 3.  $E_{п1} = 18$  кДж;  $E_{к1} = 0$ ;  $m = 300$  кг. Упр. 29. 1.  $E_{п} = 90$  Дж. 2.  $h = 40$  м. 3.  $E_k + E_{п} = 2,5$  Дж;  $k = 500$  Н/м. Упр. 30. 1.  $N = 100$  Вт. 2.  $N = 24$  Вт. 3.  $N = 1$  кВт. 4.  $F = 7,2$  кН. Упр. 31. 1.  $\eta = 40\%$ . 2.  $t = 1$  мин 40 с. 3.  $F = 7$  кН. 4.  $\eta = 20\%$ .

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава I. Общие сведения о движении</b>	
§ 1. Движение тел.....	8
§ 2. Пространство и время.....	11
§ 3. Основные понятия кинематики .....	14
§ 4. Векторные величины и действия над ними .....	17
Выводы по главе I .....	23
Дополнительные упражнения по главе I .....	24
<b>Глава II. Прямолинейное движение</b>	
§ 5. Понятие о прямолинейном равномерном движении .....	25
§ 6. Скорость прямолинейного равномерного движения .....	27
§ 7. Графическое изображение прямолинейного равномерного движения .....	30
§ 8. Скорость при неравномерном движении .....	33
§ 9. Ускорение при равнопеременном движении .....	36
§ 10. Скорость равнопеременного движения .....	39
§ 11. Путь, пройденный при равнопеременном движении .....	43
§ 12. Определение ускорения тела при равноускоренном движении (Лабораторная работа 1) .....	46
§ 13. Свободное падение тел .....	47
§ 14. Движение тела, брошенного вертикально вверх .....	49
Выводы по главе II .....	51
Дополнительные упражнения по главе II .....	52
<b>Глава III. Вращательное равномерное движение</b>	
§ 15. Вращательное равномерное движение тела .....	54
§ 16. Соотношения между величинами, характеризующими вращательное движение .....	57
§ 17. Центробежное ускорение .....	60
Выводы по главе III .....	63
Дополнительные упражнения по главе III .....	64
<b>ОСНОВЫ ДИНАМИКИ .....</b>	<b>65</b>
<b>Глава IV. Законы движения</b>	
§ 18. Первый закон Ньютона – закон инерции .....	66
§ 19. Взаимодействие тел. Сила .....	68
§ 20. Масса тела .....	70
§ 21. Второй закон Ньютона .....	73
§ 22. Третий закон Ньютона .....	77

§ 23. Приложение законов движения к вращательному движению .....	80
Выводы по главе IV .....	83
Дополнительные упражнения по главе IV .....	84

### **Глава V. Внешние силы и движение тел под их воздействием**

§ 24. Сила упругости .....	86
§ 25. Определение жесткости пружины (Лабораторная работа 2) .....	89
§ 26. Закон всемирного тяготения .....	90
§ 27. Сила тяжести .....	93
§ 28. Вес тела .....	95
§ 29. Перегрузка и невесомость .....	98
§ 30. Движение тел под действием силы притяжения Земли .....	101
§ 31. Искусственные спутники Земли .....	104
§ 32. Сила трения. Трение покоя .....	107
§ 33. Трение скольжения. Трение качения .....	110
§ 34. Определение коэффициента трения скольжения (Лабораторная работа 3) .....	113
§ 35. Трение в природе и технике .....	114
Выводы по главе V .....	117
Дополнительные упражнения по главе V .....	118

## **ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ** .....

### **Глава VI. Закон сохранения импульса**

§ 36. Импульс .....	121
§ 37. Закон сохранения импульса .....	125
§ 38. Реактивное движение .....	128
Выводы по главе VI .....	132
Дополнительные упражнения по главе VI .....	133

### **Глава VII. Работа и энергия. Закон сохранения энергии**

§ 39. Механическая работа .....	134
§ 40. Кинетическая энергия .....	137
§ 41. Потенциальная энергия .....	140
§ 42. Превращение потенциальной и кинетической энергий .....	142
§ 43. Закон сохранения механической энергии .....	145
§ 44. Изучение закона сохранения механической энергии (Лабораторная работа 4) .....	147
§ 45. Мощность .....	149
§ 46. Сохранение энергии в природе. Коэффициент полезного действия .....	151
Выводы по главе VII .....	154
Дополнительные упражнения по главе VII .....	155
Ответы на упражнения .....	156

УДК:53(075)

22.3

X-12

**Хабибуллаев П.**

X-12 **Физика: Механика: учеб. для 7 класса/П. Хабибуллаев, А. Байдедаев, А. Бахрамов; отв. ред. К. Турсунметов. — Изд. 3-е, исправ. и доп. — Ташкент: «O‘zbekiston milliy ensiklopediyasi», 2013. — 160 с.**

**ББК 22.3я72**

*Учебное издание*

**HABIBULLAYEV PO‘LAT QIRG‘IZBOYEVICH  
BOYDEDAYEV AHMADJON  
BAHROMOV AKBAR DALABOYEVICH**

## **F I Z I K A**

**Umumiy o‘rta ta‘lim maktablarining  
7-sinfi uchun darslik  
(rus tilida)**

*Qayta ishlangan uchinchi nashr*

**«O‘zbekiston milliy ensiklopediyasi»  
Davlat ilmiy nashriyoti  
Toshkent—2013**

Перевод с узбекского  
и редактирование  
Компьютерная верстка

**З. Файзиева  
Д. Хасанова**

Подписано в печать 01.05.2013 г. Формат 70x90 <sup>1/16</sup>.  
Гарнитура «SchoolBook», кегль 11. Печать офсетная.  
Уч.-изд. л. 9,27. Усл. печ. л. 11,7.  
Тираж 43356. Заказ № 13—125.

Государственное научное издательство «O‘zbekiston milliy ensiklopediyasi».  
100129, Ташкент, ул. Навои, 30.

Напечатано в типографии Издательско-полиграфического творческого  
дома «O‘zbekiston» Агентства печати и информации Узбекистана  
Ташкент—129, ул. Навои, 30.

Таблица состояния учебника

№	Имя и фамилия учащегося	Учебный год	Первоначальное состояние учебника	Подпись классного руководителя	Состояние учебника при сдаче	Подпись классного руководителя
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

**При оценке состояния учебника, выданного во временное пользование, в конце учебного года учитель основывается на следующих критериях:**

Новый	Сохранено первоначальное состояние учебника
Хороший	Обложка целая, не отделена от основной части учебника. В наличии все страницы, целые, по порядку, без надписей и рисунков на страницах.
Удовлетворительный	Обложка мягкая, частично исписанная, края листов загнуты, удовлетворительно подреставрирован учеником. Вырванные страницы вклеены, на некоторых имеются надписи.
Неудовлетворительный	Обложка исписанная, порванная, частично или полностью отделена от основной части, неудовлетворительно подреставрирован. Страницы порваны или отсутствуют, исчерчены, разрисованы. Учебник непригоден для использования.

*Свободной продаже не подлежит*



**РЦКФ**

ISBN 978-9943-07-229-9



9 789943 072299