Н.М. ШАХМАЕВ, Д.Ш. ШАДИЕВ

# ФИЗИКА

*Министерством народного образования Республики Узбекистан рекомендовано в качестве учебника для 8 класса общеобразовательной школы*

*2-издание*

ТАШКЕНТ – 2004
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «IJOD DUNYOSI»

Условные обозначения:

▌ Определение физических величин и основные законы;

☐ Особо важные формулы;

● Запомните, обратите внимание;

? Вопросы, на которые надо отвечать после чтения текста параграфа;

▪ Материал для учащихся, проявляющих повышенный интерес к физике;

° Материал для повторения ранее изученного.



Ш. $\frac{4306021200-5}{2004}$

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ



## ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

# ВВЕДЕНИЕ

Механика - это наука о движении и взаимодействии тел. Название "механика" происходит от греческого слова "механике", что означает наука о машинах, искусство постройки машин.

Первые простейшие машины (рычаг, клин, колесо, наклонная плоскость и т.д.), которые теперь называют простыми механизмами, появились в древности. Первое орудие человека палка — это рычаг. Каменный топор — сочетание рычага и клина. Колесо появилось в бронзовом веке. Несколько позже стала применяться наклонная плоскость.

Строительство плотин, мостов, пирамид, судов и других сооружений, а также ремесленное производство, с одной стороны, способствовали накоплению знаний о механических явлениях, а с другой стороны — требовали новых знаний о них.

Первые дошедшие до нас сочинения (трактаты) по механике, в которых описаны простейшие машины, принадлежат ученым Древней Греции. К ним относится сочинение Аристотеля (IV в. до н. э.) "Физика", в котором впервые введен в науку термин "механика". В этом сочинении Аристотель подытожил знания своих предшественников о механических явлениях.

В III в. до н. э. древнегреческий ученый Архимед впервые применил математику для анализа и описания механических явлений. Архимед сформулировал закон равновесия рычага и закон плавания тел. С этого времени начинается развитие механики как науки.

Новый этап в развитии механики связан с работой Г. Галилея, который сформулировал закон инерции, установил законы падения тел и колебаний маятника.

Английский физик И. Ньютон, опираясь на работы Галилея и его современников, а также на результаты своих собственных исследований, создал цельное учение о механическом движении и взаимодействии тел, которое получило название классической механики[1].

Классическая механика состоит из трех частей: кинематики, динамики и статики, к изучению которых вы и приступаете.

Для чего надо изучать механику?

Знание механики, прежде всего, необходимо для познания окружающего нас мира, так как любое явление в мире связано с движением. По существу, ни одно явление природы не может быть понято без знания механики.

Для понимания принципов устройства и работы многочисленных технических объектов (будь то пылесос или космический корабль и т.д.), для их создания, правильного и эффективного использования необходимо знание механики.

Знание механики необходимо еще и потому, что механика, как наука, была создана раньше других разделов физики, многих других наук и ее методы изучения явлений, основные понятия используются в других разделах физики и в близких к физике науках (астрономии, электро- и радиотехнике, космонавтике и др.). Не будет преувеличением сказать, что механика — фундамент физики и многих других наук. В силу сказанного знание механики необходимо человеку любой профессии.

На территории Узбекистана издавна использовались технические устройства, в частности, телеги, водяная мельница, чертово колесо, ткацкие станки и т.д. Они были созданы с применением элементов механики и работали в орошении, строительстве, текстильном производстве, зодчестве.

В IX-XV веках в произведениях таких известных ученых Востока, как Абу Райхан Беруни, Ибн Сина (Авиценна), Фергани, Улугбек и др. освещены теоретические вопросы и практические работы по механическому движению реальных тел.

[1] Классическую механику называют также механикой Ньютона.

В Узбекистане перспективы развития науки о механике связаны с вопросами решения актуальных проблем этой территории, которые сформированы в следующих основных направлениях: общая механика, механика жидкостей и газов, механика деформируемых твердых тел, прочность и сейсмодинамика сооружений, и механика механизмов.

Развитие механики в Узбекистане тесно связано с именами таких крупных ученых-механиков, как М.Т. Уразбаев, Х.А.Рахматулин, Т.Р.Рашидов и др.

**Несколько советов.** Механика — наука исключительно важная, интересная и... простая. Но для ее усвоения необходима систематическая (без пропусков) работа над каждым из изучаемых явлений. Если вы чего-то не поняли на уроке, обязательно попросите учителя объяснить. Не оставляйте непонятными даже мелкие детали изучаемого явления: они могут оказаться очень важными для понимания последующего материала. Не стесняйтесь спрашивать и задавать вопросы. Народная пословица гласит: "Кто много спрашивает, тот много знает".

Физика - наука экспериментальная. Ее трудно, почти невозможно усвоить, лишь слушая объяснения учителя и читая учебник. Каждое явление, о котором идет речь, надо увидеть. Вот почему на уроках физики учитель так много внимания уделяет демонстрации опытов или (когда это невозможно) их описанию. Однако наблюдение опытов - лишь начало изучения явления. Опыт надо понять, заметить в нем то, ради чего он ставился. Наблюдая учебные физические эксперименты (опыты), старайтесь понять: а) идею; б) схему экспериментальной установки; в) ход опыта; г) результаты.

Иногда изучаемое явление можно достаточно просто увидеть в повседневной жизни и даже воспроизвести в домашних условиях с помощью подсобных средств. Эту возможность вам надо использовать.

Это относится ко всему процессу изучения физики в школе. Теперь несколько советов, которые облегчат вам работу с учебником.

Для усвоения изучаемого материала недостаточно увидеть опыты и услышать объяснения учителя. Надо еще продумать увиденное, поразмыслить над услышанным. Учебник даст вам материал для этих размышлений.

Как бы хорошо ни объяснял учитель, всегда есть вероятность того, что какой-то материал вы поймете не полностью, а задать учителю вопрос не успеете. В этом случае в учебнике вы найдете краткое разъяснение непонятого на уроке учебного материала.

Учебник - не книга о приключениях, и читать его надо, обдумывая смысл каждой фразы. Самое важное (а оно в учебнике выделено) желательно записать в вашу тетрадь. Следует записывать все встречающиеся формулы, выводы формул, единицы измерения физических величин, зарисовывать схемы опытов и графики. Ваши записи должны быть очень краткими. Подобная запись помогает прочному усвоению материала.

Исключительно важное значение для изучения физики имеет решение задач. Решая задачи, вы не только вспомните и закрепите в памяти изученное, но, что особенно важно, научитесь творчески применять изученный материал. Умение решать задачи не приходит само собой. Оно вырабатывается постепенно в процессе самостоятельного их решения. Чтобы облегчить выработку этого умения, в учебнике приведены примеры решений. Не спеша, шаг за шагом, изучите эти примеры и запишите в тетрадь. Решая задачи самостоятельно, не отчаивайтесь при неудачах. Учеба - труд, и как всякий труд требует усилий, настойчивости и прилежания.

И еще один совет. Читая учебник, внимательно рассматривайте и обдумывайте рисунки. Рисунки в учебнике не украшения, а одна из важнейших его частей. Текст и рисунки неразрывны.

Окончив изучение главы учебника, внимательно прочтите краткие выводы из нее; каждый из них продумайте и также запишите. После этого постарайтесь ответить на вопросы и решить задачи, приведенные в конце параграфа.

Усвоению материала очень хорошо помогает обсуждение его с товарищами.

В добрый час!

# ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Слово "кинематика" происходит от греческого слова "кинематос" - движение. Кинематика изучает геометрические свойства движения. Это своеобразная "геометрия движения". Она изучает, как движется тело, и не изучает, почему тело движется так, а не иначе.

Основными задачами кинематики являются:

а) описание с помощью математических формул, графиков или таблиц совершаемых телом движений;

б) определение кинематических величин, характеризующих это движение.

Для описания движений в кинематике вводятся специальные понятия (материальная точка, система отсчета, траектория) и величины (путь, перемещение, скорость, ускорение), которые важны не только в кинематике, но и в других разделах физики. Овладение этими понятиями и величинами - одна из основных задач, которая стоит перед вами при изучении кинематики. Кроме того, вы должны познакомиться и понять методы кинематики, т.е. узнать, как в кинематике изучают движения, изучить с точки зрения кинематики несколько видов движения и научиться решать простейшие кинематические задачи.

## § 1°. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

**1. Движение - неотъемлемое свойство материи.**

Все, что реально существует в мире, все, что нас окружает: дома, промышленные сооружения, машины, птицы, животные, рыбы, растения, микроорганизмы, вода, воздух, свет, молекулы, атомы, протоны, электроны, радиоволны и т.д., все, что мы можем ощущать непосредственно или с помощью специальных приборов, в науке называют *материей*.

Одно из основных свойств материи - движение.

Самый простой вид движения - это механическое движение, при котором одно тело изменяет с течением времени свое положение относительно других тел. Примерами такого движения служат движения автомашин, теплоходов, мотоциклов, движение хоккейной шайбы и футбольного мяча, падение дождевых капель и снежинок, полет ракет и самолетов и др.

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

**2. Система отсчета.**

Движущееся тело с течением времени изменяет свое положение относительно других тел. Тело, относительно которого изучается движение рассматриваемого

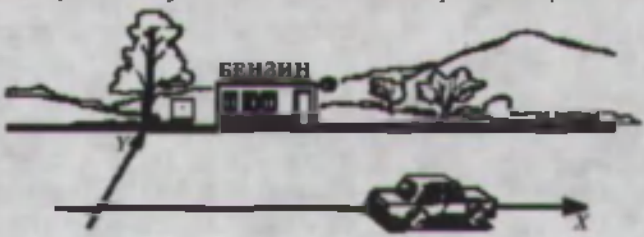



*Рис. 1*

тела, называют *телом отсчета.* Допустим, что автомобиль едет вдоль улицы. В этом случае любой дом, дерево, газетный киоск может быть принят за тело отсчета (рис. 1). Телом отсчета может служить и другой движущийся автомобиль или мотоцикл.

Для того, чтобы описать изучаемое движение, надо знать, как изменяется с течением времени положение тела относительно выбранного тела отсчета. Для этого необходима система координат и часы. Начало координат совмещают с телом отсчета. *Систему координат и часы, связанные с телом отсчета, называют системой отсчета.*

Выбор той или иной системы отсчета зависит от человека, изучающего движение.

**3. Относительность движения.**

Допустим, что человек, неподвижно сидящий на движущейся платформе, наблюдает за арбузом, лежащим на платформе (рис. 2). Естественно, что он мысленно свяжет систему отсчета с платформой. Для него

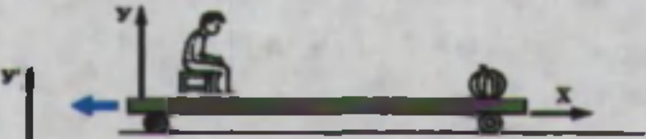



*Рис. 2*

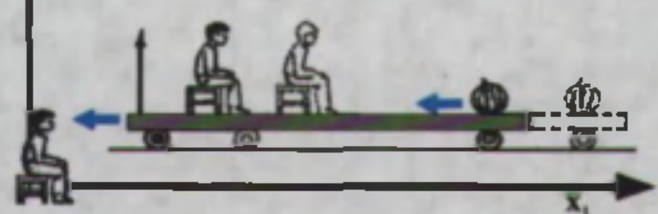



*Рис. 3*

(или, что одно и то же, в системе отсчета XY, связанной с платформой) арбуз находится в покое.

В это же самое время человек, находящийся у полотна железной дороги (рис. 3), мысленно связав систему отсчета с землей, увидит, что арбуз движется!

Рассмотренный пример показывает, что одно и то же тело движется в различных системах отсчета поразному: в системе отсчета, связанной с платформой, арбуз находится в относительном покое, а относительно системы отсчета, связанной с землей, движется. Поэтому в физике говорят: движение относительно.

В эту фразу вкладывается тот смысл, что движение всегда рассматривается относительно какой-то системы отсчета.

Системы отсчета, связанные с землей, называют земными, а системы отсчета, связанные с конкретной физической лабораторией, называют лабораторными. Само собой разумеется, что в том случае, когда лаборатория находится на Земле и неподвижна, лабораторная система отсчета является земной.

1. Что в науке называют материей?
2. Назовите одно из основных свойств материи.
3. Какое движение называют механическим?
4. Что входит в понятие "система отсчета"?

## § 2. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

### 1. Пространство.

Все, что существует в мире, существует в пространстве. Нет и не может быть ни одного объекта, который сам бы не занимал пространства и существовал бы вне пространства. Иными словами, *пространство неразрывно связано с материей. Пространство бесконечно и безгранично.*

В правильности этого утверждения убеждает следующий факт. Астрономы с помощью телескопов изучают космические объекты, свет от которых доходит до Земли лишь через миллиарды лет! Такие огромные расстояния невозможно даже образно представить, их можно только выразить математически - числами. Но и за этими небесными телами есть другие тела, расположенные еще дальше.

В механике Ньютона, к изучению которой вы приступаете, пространство считается одинаковым по всем направлениям. Итак, пространство однородно и изотропно.

Основные свойства пространства: *объективное существование, неразрывность с материей* (в мире нет ни одного объекта, не связанного с пространством), *бесконечность, протяженность, трехмерность* (все физические объекты имеют длину, ширину и высоту).

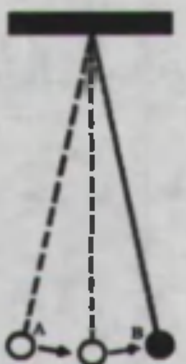


*Рис. 4*

### 2. Время.

Тела движутся, т.е. изменяют свое положение не только в пространстве, но и во времени. В механике Ньютона, как и в повседневной жизни, время течет равномерно. Это проявляется в том, что *одно и то же физичес-*

кое явление в одних и тех же условиях всегда занимает одинаковое время. Например, шарик, подвешенный на нити к потолку лаборатории (рис. 4), если условия в лаборатории не будут изменяться, всегда будет переходить из положения А в положение В за одно и то же время независимо от того, когда это явление будет наблюдаться - днем или ночью, летом или зимой.

Основные свойства времени: *объективное существование, непрерывность, одновременность* (время течет только вперед - от прошлого к будущему).

● Время неразрывно связано с материей, движением и пространством.

**3. Как изучают движение.**

Исследование любого явления начинается с созерцания его в естественной обстановке. Допустим, мы хотим изучить движение падающих тел. Прежде всего надо увидеть такое движение. Но этого недостаточно. На самом деле, сколько раз вы видели падение тел, но сейчас не сможете исчерпывающе ответить на такие, казалось бы, простые вопросы: как движутся падающие тела? Почему они падают на Землю? Одинаковое ли расстояние проходит падающее тело за первую и вторую секунду своего падения?

После того, как человек увидел то или иное движение и заинтересовался им, он должен искусственно в удобных для него условиях воссоздать движение. Так, для изучения падения тел итальянский физик Галилео Галилей, согласно устным преданиям, роняя с башни в г. Пизе одновременно чугунные и каменные шары, убедился, что они достигали основания башни в одно и то же время (рис. 5). Галилей предположил

*Рис. 5*

(выдвинул гипотезу), что легкое птичье перышко упало бы с башни одновременно с тяжелыми шарами, если бы не было сопротивления воздуха.

Научную гипотезу (как и всякое предположение) надо проверить. В физике для проверки гипотез ставят специальные опыты (эксперименты). Предположение Галилея было проверено после изобретения воздушного насоса. Для проверки гипотезы Галилея внутрь длинной стеклянной трубки поместили свинцовый шарик и птичье перо. Перевернув трубку, еще раз убедились, что свинцовый шарик в воздухе падает гораздо быстрее птичьего перышка (рис. 6, *a*). Затем откачали из трубки воздух (рис. 6, *b*) и повторили опыт. Оказалось, что в разреженном воздухе свинцовый шарик и птичье перышко падают одновременно (рис. 6, *d*). Так, опыт подтвердил гипотезу Галилея.

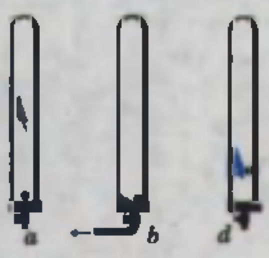



*Рис. 6*

Позже Ньютон разработал теорию, которая объяснила, почему и как падают тела на Землю, а также многие другие механические явления. Она не потеряла своего значения и в наше время: классическая механика используется, например, для расчетов, связанных с движением поездов, самолетов, искусственных спутников Земли, с запуском космических кораблей к другим планетам Солнечной системы, устройством машин и механизмов, строительством зданий и т.д.

Таким образом, изучение движения тел, как и других физических явлений, проходит обычно следующие основные стадии:

1. Наблюдение явления в естественной обстановке.
2. Наблюдение явления в специально созданных условиях.
3. Выдвижение предложения (гипотезы) для объяснения изучаемого явления.
4. Экспериментальная проверка гипотезы.
5. Анализ результатов эксперимента, который либо

подтверждает выдвинутую гипотезу (тогда она ставится базой для создания теории или входит составной частью в уже существующую теорию), либо делает необходимым выдвижение новой гипотезы.

6. Теория не только объясняет уже известные явления и закономерности, но и предсказывает новые явления и новые закономерности, что является самым убедительным доказательством ее справедливости.

?

1. Назовите основные свойства пространства.
2. Назовите основные стадии изучения физических явлений.
3. Что означает слово "гипотеза"?

## § 3°. НЕСКОЛЬКО ВАЖНЫХ ПОНЯТИЙ В КИНЕМАТИКЕ

### 1.° Материальная точка.

Материальная точка — это абстрактное понятие, введение которого упрощает изучение многих физических явлений. Мы часто будем пользоваться этим понятием, а потому дадим ему определение:

*Материальной точкой называют тело, размерами и формой которого в рассматриваемом случае можно пренебречь.*

Вдумаемся в это определение. В нем ничего не сказано об абсолютных размерах тел, которые можно заменить материальной точкой. Это не случайно: все зависит от относительных размеров тел и расстояний между ними, а также от того, какую задачу мы решаем.

Например, изучая движение Земли вокруг Солнца, Землю можно считать материальной точкой, так как расстояние между Землей и Солнцем примерно в 25 000 раз больше радиуса Земли. Но тело спортсмена, делающего сальто в воздухе (рис. 7), нельзя заме-

Рис. 7

нить материальной точкой, ибо в этом случае размеры тела лишь в несколько раз меньше расстояния, преодолеваемого спортсменом.

**2.° Траектория.**

***Непрерывную линию, которую описывает движущееся тело (рассматриваемое как материальная точка) по отношению к выбранной системе отсчета, называют траекторией.***

Траектория может быть известна еще до начала движения. Так, полотно железной дороги определяет траекторию поездов. Иногда траекторию можно найти, исходя из других данных о движении тела, например, заранее рассчитывается траектория движения искусственных спутников Земли, космических станций, направляемых к планетам Солнечной системы. На рисунке 8 показаны возможные траектории полета космического корабля на Марс и его возвращение на Землю. Отдельно, в увеличенном масштабе, показан участок траектории полета кабины с космонавтами в плотных слоях атмосферы Земли.

В зависимости от траектории движения могут быть прямолинейными (например, падение шаров с башни в опыте Галилея) и криволинейными (например, движение брошенного мяча).

Траектория одного и того же движения различна в различных системах отсчета. Так, например, в системе

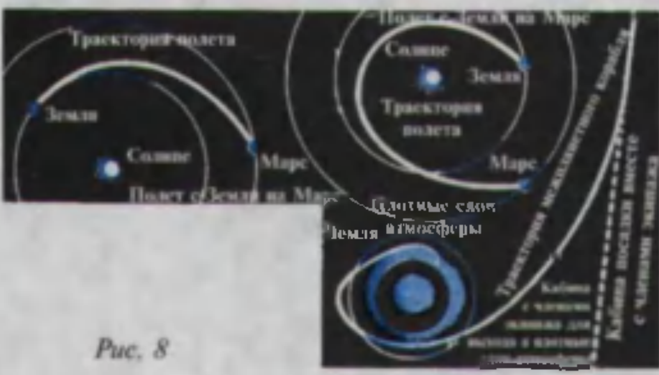



*Рис. 8*

отсчета, связанной с движущейся платформой (рис. 9, *a*), траектория падения мяча — прямая линия, а в системе отсчета, связанной с наблюдателем, неподвижно находящимся у железнодорожного полотна (рис. 9, *b*), — кривая линия.

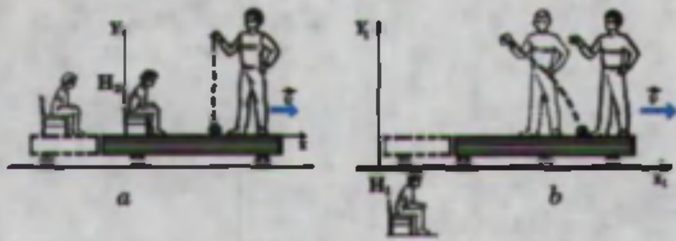


*Рис. 9*

**3.° Путь и перемещение.**

Расстояние, пройденное телом (материальной точкой) *вдоль траектории движения*, называют *путем*. Мы будем обозначать его буквой *s*.

*Перемещением* называют направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положение тела.

Перемещение обозначают буквой $\vec{s}$ и ему приписывают направление от начальной точки движения к конечной. Величины, для которых характерно не только численное значение, но и направление, называют *векторными*. Следовательно, *перемещение — величина векторная.*

Таким образом, ***перемещением называют вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела, он направлен от начальной точки движения тела к конечной.***

Величины, для которых нехарактерно направление и которые (в отличие от векторных величин) выражены только числом, называют *скалярными*. К скалярным величинам относятся площадь, время, температура, объем и др.

Следует всегда различать понятия пути и перемещения. Это два разных понятия. Путь - величина скалярная, а перемещение - векторная.

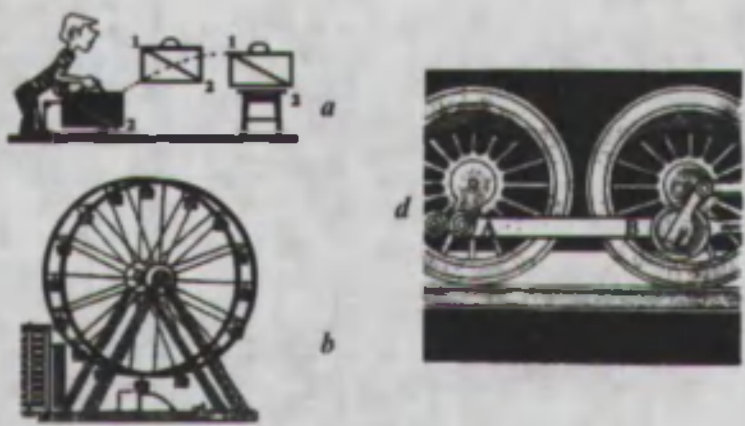



*Рис. 10*

**4. Поступательное движение.**

Тело может двигаться так, что прямая, соединяющая две любые его точки, перемещаясь, остается параллельной самой себе. Такое движение твердого тела называют *поступательным*. Например, поступательно движется чемодан, переставляемый за ручку с пола на подставку; кузов автомашины, движущейся на прямолинейном участке пути; кабина колеса обозрения; штанга АВ, соединяющая два соседних колеса тепловоза (рис. 10 *a*, *b*, *d* ).

При поступательном движении все точки тела описывают одинаковые траектории и за одно и то же время совершают одинаковые перемещения, двигаясь с одинаковыми скоростями. Поэтому поступательное движение тела можно рассматривать как движение материальной точки.

?

1. Что такое материальная точка?
2. Зависит ли форма траектории от выбора системы отсчета?
3. Дайте определение перемещения.
4. Какое движение твердого тела называют поступательным?

## § 4.* ДЕЙСТВИЯ НАД ВЕКТОРАМИ

Действия (операции) над векторами вы изучали в курсе математики. В этом параграфе напоминаются основные сведения о векторах и операциях над ними.

**1. Обозначения векторных величин.**

Векторные величины изображаются в виде направленных отрезков (стрелок), длина которых пропорциональна их модулям (модулем векторной величины называют ее численное значение, взятое со знаком плюс), а стрелки показывают направления. Векторные величины обозначаются буквами полужирного шрифта (***A***, ***B***, ***C***, ...) или, как это принято в нашем учебнике, буквами, над которыми поставлены стрелки ($\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$, ...). Модуль вектора - величина скалярная и всегда положительная. Модуль вектора обозначают $|A|$ или $|\vec{A}|$, мы модуль вектора $\vec{A}$ будем обозначать $A$.

**2. Проекция вектора.**

Проекциями вектора $\vec{A}$ на координатные оси $X$ и $Y$ называют длину отрезков $A_x$ и $A_y$ (рис. 11), ограниченные проекциями начала и конца вектора на соответствующую ось координат, взятые со знаком плюс или минус. *Проекции вектора — величины скалярные.*

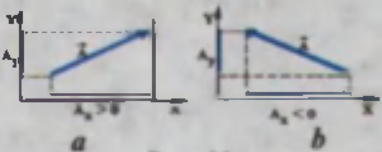



*Рис. 11*

Проекция вектора на выбранную ось считается положительной (рис. 11, *a*), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо идти по направлению оси, и отрицательной (рис. 11, *b*), если от проекции начала вектора к проекции его конца надо идти против направления оси.

**3. Сложение векторов.**

Из курса математики вы знаете, что векторные величины складываются геометрически. Проиллюстрируем это свойство векторных величин на примере сложения перемещений.

Допустим, что пловец плывет по реке из точки $O$ перпендикулярно течению воды (рис. 12, *a*). Его пере-

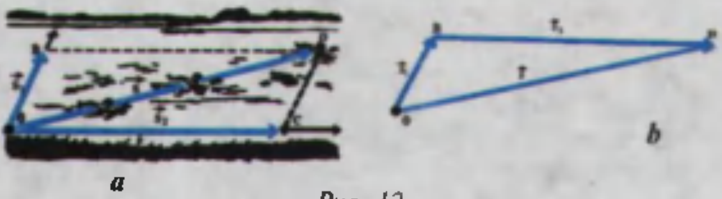


Рис. 12

мещение относительно воды за некоторое время будет $\vec{s}_1$, а перемещение воды относительно берега за это же время $\vec{s}_2$. На расстояние $\vec{s}_2$ вода перенесет и пловца. В результате сложения перемещения пловца относительно воды и воды относительно берега пловец окажется в точке *D*. Его результирующее перемещение относительно системы отсчета, связанной с Землей, равно диагонали *OD* параллелограмма *OBDC*, построенного на складываемых перемещениях $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$: $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$.

Сложение векторов можно провести и иначе: к концу вектора $\vec{s}_1$ переносят параллельно самому себе вектор $\vec{s}_2$ (рис. 12, *b*). Результирующий вектор $\vec{s} = OD$ будет замыкающей стороной треугольника *OBD*.

Подобным образом поступают и тогда, когда надо сложить больше двух векторов. В этом случае берут один из векторов (безразлично, какой) и к его концу переносят любой из слагаемых векторов параллельно самому себе (рис. 13, *a*). К концу перенесенного вектора подобным же образом приставляют третий вектор, затем так же поступают с четвертым и т.д. Сумма векторов, которую называют результирующим вектором, равна вектору *R*, замыкающему образовавшийся многоугольник. Этот вектор направлен от начала первого вектора к концу последнего из слагаемых векторов.

Сложение векторов записывают следующим образом:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + ... + \vec{F}_n.$$

Все сказанное о векторных величинах можно обобщить в следующем определении:

***Физические величины, характеризующиеся числовым значением, направлением и геометрическим способом сложения, называют векторными.***

**4. Произведение вектора на скаляр.**

При умножении вектора $\vec{A}$ на скаляр $k$ мы получаем новый вектор $\vec{P}$, модуль которого равен произведению модуля вектора $\vec{A}$ на модуль скаляра $k$:

$$\vec{P} = k\vec{A}.$$

Вектор $\vec{P}$ направлен так же, как вектор $\vec{A}$, если скаляр $k$ положителен, и противоположно вектору $\vec{A}$, если скаляр $k$ отрицателен.

**5. Вычитание векторов.**

Чтобы из вектора $\vec{A}$ вычесть вектор $\vec{B}$ (рис. 13, *b*), необходимо сложить вектор $\vec{A}$ с вектором, противоположно направленным вектору $\vec{B}$. Для этого к концу вектора $\vec{A}$ (по правилу треугольника) переносим вектор $\vec{B}$ (рис. 13, *d*). Замыкающая сторона треугольника $\vec{C} = \vec{A} - \vec{B}$.

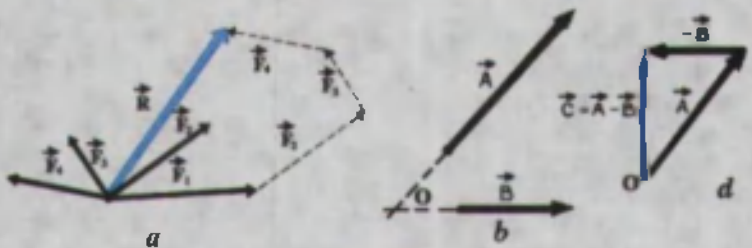



*Рис. 13*

?

1. Приведите примеры векторных величин. Как обозначают векторные величины?
2. Что такое проекция вектора?
3. Как складывают векторные величины?
4. Как вычитают векторные величины?
5. Скорость течения воды в реке 4 м/с. Лодка движется перпендикулярно течению со скоростью 3 м/с относительно воды. Определите скорость движения лодки относительно берега.

### *Упражнение 1*

**1.** Можно ли тело спортсмена при прыжке сальто в воду принять за материальную точку? Ответ обоснуйте.

**2.** Автомобиль дважды проехал вокруг Москвы по кольце-

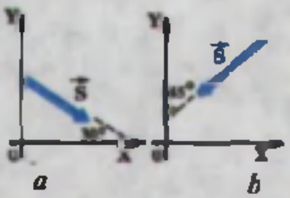


Рис. 14

вой дороге, длина которой 109 км. Чему равны пройденный автомобилем путь и его перемещение?

3. Модуль вектора перемещения $s = 10$ км. Определите проекции вектора на оси координат, когда он расположен так, как на рисунке 14 *a*, *b*.

4. Докажите, что при сложении нескольких векторов порядок переноса слагаемых векторов не влияет на модуль и направление результирующего вектора.

5. Покажите, что проекция результирующего вектора равна сумме проекций складываемых векторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВВЕДЕНИЯ

1. Все, что реально существует в мире, все, что через наши ощущения отражается нашим сознанием, в науке принято называть одним словом "материя". Мир, изменяясь, существует вечно. Он существовал до нас и будет существовать после нас. Следовательно, вечна и материя.

2. Одним из свойств материи является движение - вечное ее изменение. Простейший вид движения (механическое движение) — изменение с течением времени положения тел относительно других тел. Движение тел вечно.

3. Механическое движение относительно. В разных системах отсчета у движущегося тела различны траектории, пути и перемещения. Относителен и покой. Тело может находиться в покое относительно одной системы отсчета и двигаться относительно другой.

4. Для описания механического движения введен ряд понятий (материальная точка, траектория, система отсчета, поступательное движение) и величин (путь, перемещение). Ниже дано определение этих понятий и величин.

а) Систему координат и часы, связанные с телом отсчета, называют системой отсчета.

б) Материальной точкой называют тело, размерами и формой которого в рассматриваемом случае можно пренебречь.

в) Непрерывную линию, которую описывает тело (рассматриваемое как материальная точка) по отношению к выбранной системе отсчета, называют траекторией.

г) Расстояние, пройденное телом (материальной точкой) вдоль траектории движения, называют путем.

д) Перемещением называют вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела, направленный от начальной точки движения к конечной.

е) Поступательным движением тела называют такое движение, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается параллельно своему начальному положению.

# Глава I. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Изучение механического движения мы начнем с наиболее простого его вида — с движения, происходящего вдоль прямой линии, а из всего многообразия прямолинейных движений выберем равномерное движение. *Равномерным движением называют такое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени проходит соответственно равные расстояния.*

Например, если автомобиль на прямолинейном участке дороги двигался так, что

за каждый час проезжал — 80 км,
за каждые 1/2 ч — 40 км,
за каждые 1/4 ч — 20 км,
за каждые 1/8 ч — 10 км,
за каждые 1/16 ч — 5 км,
за каждые 1/32 ч — 2,5 км,
за каждые 1/64 ч — 1, 25 км и т.д.,

то движение автомобиля на этом участке было равномерным.

## § 5°. СКОРОСТЬ РАВНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

**1. Определение скорости.**

Движению присущи различные свойства (качества), для характеристики которых введены специальные понятия и величины. С некоторыми из них мы уже познакомились. Так, для характеристики геометрических свойств движения введены такие понятия, как "траектория", "система отсчета", и такие величины, как "путь", "перемещение". Однако они не характеризуют движение исчерпывающе. Предположим, что по одному и тому же шоссе одновременно трогаются и движутся автомобилист, мотоциклист, велосипедист и пешеход. Все четверо двигаются по одинаковым траекториям, проходят и проезжают равные расстояния. Однако их движения различны: они отличаются таким качеством, которое мы обычно называем быстрота, стремительность. Для его характеристики, как вы знаете из курса физики VI класса, введено понятие "скорость":

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

Так как перемещение $\vec{s}$ — величина векторная, а промежуток времени $t$ — величина скалярная, то скорость движения $\vec{v}$ — величина векторная. (Из курса математики известно, что частное от деления векторной величины на скалярную есть вектор). Ее направление на данном участке движения совпадает с направлением перемещения.

**Примечание.** В случае прямолинейного движения проекции векторов перемещения и скорости на траекторию движения совпадают с алгебраическим значением этих величин:

$v_x = v$; $s_x = s$. Поэтому $v=\frac{s}{t}$.

Опираясь на сказанное выше, скорость движения можно определить следующим образом:

*Скоростью движения называют векторную физическую величину, характеризующую быстроту (стремительность) и направление движения.*

Скорость равномерного движения равна отношению перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло:

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

Для того чтобы найти модуль скорости, формулу скорости надо записать в скалярной форме через модули входящих в формулу векторных величин:

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

В практике часто приходится иметь дело со скоростью движения по траектории: $v = \frac{s}{t}$, где $s$ — путь, пройденный телом. Эту скорость принято называть путевой.

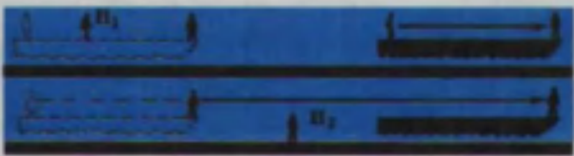


*Рис. 15*

**2. Относительность скорости.**

Допустим, что по палубе самоходной баржи матрос прошёл от кормы к носу расстояние 120 м за 2 мин (рис. 15, *а*). Наблюдатель $H_1$, находящийся на барже, определит, что скорость движения матроса относительно баржи: $v_1 = \frac{120 \text{ м}}{120 \text{ с}} = 1\frac{\text{м}}{\text{с}}$. В это же самое время наблюдатель $H_2$, находящийся на берегу, заметит, что человек прошел по палубе баржи 120 м, а баржа сместилась по реке на 240 м (15, *b*). Общее перемещение человека относительно берега: 120 м + 240 м = 360 м, а его скорость:

$$v_2 = \frac{360\text{м}}{120\text{с}} = 3\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

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

**?**

1. Дайте определение скорости равномерного движения.
2. Покажите на примере, отличном от приведенного в учебнике, что скорость зависит от системы отсчета.
3. Тело движется поступательно. Одна из его точек имеет скорость 1 м/с. Какова скорость движения других точек тела?
4. Установите, какая единица скорости больше: 1 м/с или 1 км/ч.

## § 6. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

**1. Формула перемещения.**

Из формулы скорости следует, что перемещение тела при равномерном движении пропорционально времени движения:

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

● Формулу перемещения называют *уравнением движения*. Полученная формула — уравнение прямолинейного равномерного движения.

В тех случаях, когда нет необходимости подчеркивать векторный характер уравнения (например, при прямолинейном движении), мы будем записывать это уравнение в скалярной форме:

$$s = vt.$$

**2. Три способа определения положения тела.**

Определить положение тела относительно выбранной системы отсчета можно тремя способами: векторным, координатным и траекторным (естественным).

Пусть точка движется относительно выбранной системы со скоростью $v$ (рис. 16, *а*).

При координатном способе положение движущегося тела относительно выбранной системы отсчета определяется тремя координатами $x$, $y$ и $z$. При этом $x = x_0 + v_x t$; $y = y_0 + v_y t$ и $z = z_0 + v_z t$, где $v_x$, $v_y$ и $v_z$ —

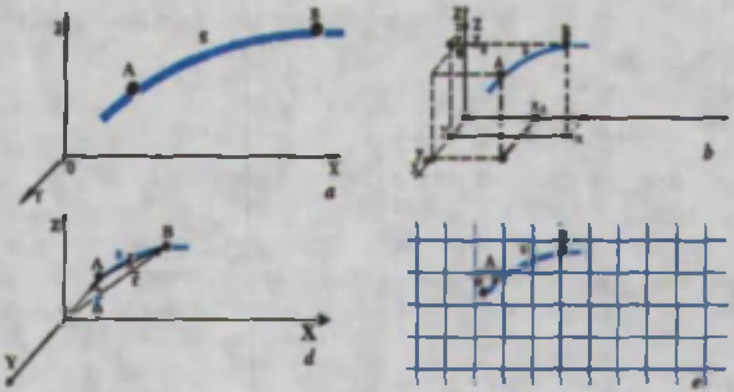


*Рис. 16*

проекции скорости движения на соответствующие оси (рис. 16, *b*), а $x_0$, $y_0$ и $z_0$ — координаты тела в начальный момент.

При векторном способе положение тела в любой момент определяется вектором $\vec{r}$, проведенным из начала координат в точку, где находится тело. Вектор $\vec{r}$ называют радиус-вектором.

Допустим, что в начальный момент положение точки определяется радиус-вектором $\vec{r}_0$ (рис. 16, *d*). Через промежуток времени $\Delta t$ точка переместилась в новое положение, определяемое радиус-вектором $\vec{r}$. Вектор $\vec{s}$, проведенный из начального положения точки в конечное, является ее перемещением.

При естественном способе описания движения начало системы отсчета берется на траектории (рис. 16, *e*). Пусть начальное положение материальной точки *A*, а положение через промежуток времени $\Delta t$ — *B*. Положение движущегося тела определяется расстоянием *s*, измеренным вдоль траектории и взятым с соответствующим знаком. Этот способ удобен тогда, когда траектория движущегося тела известна заранее.

Особенно удобен этот способ при изучении прямолинейного движения. Поэтому мы чаще будем пользоваться естественным способом описания движений.

В случае прямолинейного движения проекции векторов перемещения и скорости на траекторию движения совпадают с алгебраическим значением этих величин:

$$s_x = s \text{ и } v_x = v.$$

Поэтому модуль скорости $v = \frac{s}{t}$ иногда называют *путевой скоростью или просто скоростью.*

**П р и м е ч а н и е .** Поскольку ни в обычной, ни в научной речи не принято говорить: "Модуль перемещения пешехода, двигавшегося по прямолинейному шоссе со скоростью, равной по модулю 4 км/ч, равен 12 км", то в дальнейшем, чтобы не загромождать речь термином "модуль", под словами "скорость" имеется в виду модуль скорости.

**3.* Пример решения задач.**

Найдите модуль перемещения (путь) реактивного самолета за 0,1 ч полета по прямолинейной траектории, если известно, что он летел равномерно со скоростью 330 м/с.

***Анализ условия.*** *В условии задачи сказано*, что самолет двигался по прямой линии равномерно. Следовательно, выбрав систему координат так, чтобы одна из ее осей была бы направлена по движению, а ее начало совпадало с начальным положением самолета, для нахождения его положения через 0,1 ч полета можно воспользоваться уравнением прямолинейного равномерного движения.

**Решение.** Так как скорость самолета выражена в метрах в секунду, время полета необходимо выразить в секундах:

$t = 0{,}1 \cdot 60 \cdot 60$ с $= 360$ с.

Модуль перемещения самолета (путь) равен:

$s = 330$ м/с $\cdot$ 360 с $= 118\,800$ м.

Условие задачи, ее решение и анализ удобно записывать так:

| | |
|---|---|
| $v = 330$ м/с<br>$t = 360$ с | $s = vt.$ $s = 330$ м/с$\cdot$360 с $\approx 1{,}19 \cdot 10^5$м. |
| $s = ?$ | **Ответ**: $s \approx 1{,}19 \cdot 10^5$м. |

1. Напишите уравнение равномерного движения вдоль прямой линии в векторной и скалярной форме.

2. Какими способами можно определить положение тела?

3. Автомобилист, двигаясь равномерно со скоростью 20 м/с, проехал половину пути до места назначения за 1,25 ч. С какой скоростью он должен продолжать равномерное движение, чтобы за 3 ч успеть достигнуть цели и вернуться обратно? (Ответ: $v = 90$ км/ч).

## § 7. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ

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

**1. График скорости.**

Для построения графика скорости берут прямоугольную систему координат, по горизонтальной оси которой откладывают в определенном масштабе время, а по вертикальной — модуль скорости. Так как при равномерном движении скорость — величина постоянная, график скорости представляет собой прямую, параллельную оси времени. На рис. 17 показаны графики скоростей четырех движений.

В том случае, когда движение тела происходит в сторону, противоположную направлению оси координат, график скорости располагается ниже оси времени.

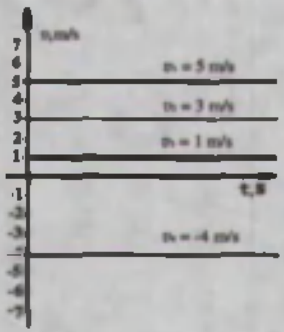



*Рис. 17*

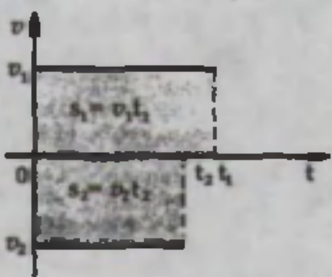



*Рис. 18*

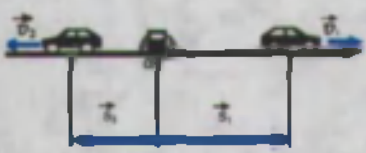


*Рис. 19*

С помощью графика скорости можно определить пройденное телом расстояние. Мы знаем, что при равномерном движении путь тела равен произведению скорости на время движения: $s = vt$. Это произведение численно равно *площади закрашенного прямоугольника* (рис. 18), сторонами которого служат ось координат, график скорости и ордината, соответствующая времени движения.

**2.* Примеры решения задач.**

**1.** По прямолинейной дороге навстречу друг другу равномерно движутся два автомобиля: один - со скоростью 90 км/ч, другой — со скоростью 72 км/ч. Автомобили встретились у заправочной станции и, не останавливаясь, продолжили свое движение. Определите положение автомобилей по отношению друг к другу и относительно заправочной станции через 3 мин после встречи.

**Анализ условия.** Движение автомобилей прямолинейное и равномерное; требуется определить их положение относительно друг друга и относительно заправочной станции. Свяжем систему отсчета с дорогой, начало отсчета будем вести от заправочной станции (рис. 19). В этом случае расстояния, пройденные автомобилями, можно определить по формуле $s = vt$.

**Решение.** *Автомобили отойдут от заправочной станции* соответственно на расстояния $s_1 = v_1t$ и $s_2 = v_2t$.

Расстояние между ними будет $s = s_1 + s_2$.

**Вычисление.** Выразим данные условия задачи в единицах Международной системы.

$$v_1 = 90 \text{км/ч} = \frac{90000 \text{м}}{3600 \text{ с}} = 25 \text{м/с};$$

$$v_2 = 72 \text{ км/ч} = \frac{72000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 20 \text{м/с}; \ t = 30 \text{ мин} =$$

$$= 30 \cdot 60 \text{ с} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

$v_1 = 25$ м/с
$v_2 = 20$ м/с
$t = 1,8 \cdot 10^3$с

$s_1 = ?$
$s_2 = ?$
$s = ?$

$s_1 = 25$ м/с $\cdot 1,8 \cdot 10^3$с $= 4,5 \cdot 10^4$ м;
$s_2 = 20$ м/с $\cdot 1,8 \cdot 10^3$ с $= 3,6 \cdot 10^4$ м;
$s = 4,5 \cdot 10^4$ м $+ 3,6 \cdot 10^4$ м $= 8,1 \cdot 10^4$ м.

**Ответ**: $s_1 = 4,5 \cdot 10^4$ м; $s_2 = 3,6 \cdot 10^4$ м; $s = 8,1 \cdot 10^4$ м .

**2.** Автомобиль, двигаясь равномерно со скоростью 30 км/ч, проехал половину пути до места назначения. С какой скоростью должен двигаться автомобиль на оставшемся участке, чтобы за такое же время доехать до места назначения и вернуться туда, откуда он выехал?

**Анализ условия.** В условии задачи ничего не сказано о траектории движения автомобиля. Траектория может быть и прямолинейной, и криволинейной. Будем для простоты считать, что траектория движения — прямая линия. Автомобиль двигался к цели и обратно равномерно. Будем считать, что на поворот он времени не затратил. Так как автомобиль проехал только половину первой части пути, то ему еще предстоит проехать расстояние, в 3 раза большее пройденного (рис. 20). Систему отсчета свяжем с дорогой.

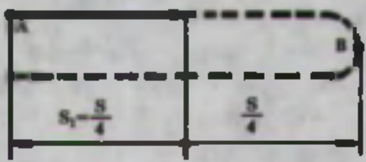


*Рис. 20*

**Решение.** Автомобиль проехал расстояние $s_1 = v_1 t$, а предстоит ему проехать расстояние $s_2 = 3s_1$. Скорость его движения на оставшемся участке пути должна быть:

$$v_2 = \frac{s_2}{t} = \frac{3s_1}{t}.$$

Нетрудно заметить, что $\frac{s_1}{t}$ — это скорость автомобиля на первой четверти его полного пути ($v_1$). Поэтому $v_2 = 3v_1$.

$v_1 = 30$ км/ч.
$s_1 = \frac{1}{4}\ s$

$v_2 = ?$

$v_2 = 3\ v_1 = 3 \cdot 30$ км/ч $= 90$ км/ч.

**Ответ:** $v_2 = 90$ км/ч.

Продумайте и докажите, что решение справедливо и для случая движения по криволинейной траектории.

***Упражнение 2***

**1.** Скорость самолета относительно воздуха 800 км/ч. С какой скоростью движется самолет относительно поверхности Земли, если дует попутный ветер со скоростью 20 м/с? (Ответ: $v \approx 240$ м/с).

**2.** По двум взаимно перпендикулярным шоссейным дорогам движутся равномерно грузовая и легковая машины со скоростями соответственно 36 км/ч и 72 км/ч. На каком расстоянии окажутся друг от друга автомобили через 10 мин после встречи у перекрестка? (Ответ: $s \approx 13{,}4$ км).

**3.** По двум пересекающимся под углом 60° дорогам движутся две автомашины с одинаковыми скоростями, равными 72 км/ч. Через какое время после встречи у перекрестка расстояние между ними станет равным 3 км? (Ответ: $t = 150$ с).

**4.** Две моторные лодки движутся вдоль реки навстречу друг другу. Скорость течения 2 м/с, скорость каждой лодки относительно воды 3 м/с. Через какое время после встречи расстояние между лодками станет равным 120 м? Решите задачу в системах отсчета, связанных с Землей и одной из лодок. (Ответ: $t = 20$ с).

**5.** Поезд длиной 120 м движется по мосту равномерно со скоростью 180 км/ч. За сколько времени поезд пройдет мост, если длина моста 480 м? Можно ли поезд здесь рассматривать как материальную точку? (Ответ: $t = 12$ с).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ I

**1.** Наиболее простым видом механического движения является равномерное движение материальной точки вдоль прямой линии.

**2.** Равномерным называют такое движение, при котором тело за любые, но равные промежутки времени проходит соответственно равные расстояния, или, что одно и то же, такое движение, при котором модуль скорости остается постоянным.

**3.** Скоростью называют векторную физическую величину, характеризующую быстроту и направление движения. Скорость равномерного прямолинейного движения равна отношению перемещения тела к промежутку времени, за которое это перемещение произошло.

**4.** Перемещение тела при прямолинейном равномерном движении прямо пропорционально времени движения.

# ГЛАВА II. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ПРЯМОЙ ЛИНИИ

Равномерное движение по прямой линии, рассмотренное в главе I, встречается сравнительно редко. Равномерно и прямолинейно тела движутся лишь на небольших участках своего пути, а на остальных участках их скорость изменяется. Движение с изменяющейся по модулю скоростью называют *неравномерным*. В этой главе мы будем изучать неравномерное движение по прямой линии.

## § 8. СКОРОСТЬ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

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

$$v = \frac{\vec{s}_1}{t_1} = \frac{\vec{s}_2}{t_2} = \frac{\vec{s}_3}{t_3} = \ldots = \frac{\vec{s}_N}{t_N} = \text{const}^1.$$

В случае неравномерного движения модуль скорости изменяется, и на каждом, даже самом маленьком

[1] От латинского слова "constantus" — постоянно, неизменно.

участке он отличается от модуля скорости на соседних участках:

$$\vec{v}_1 = \frac{\vec{s}_1}{t_1}; \ \vec{v}_2 = \frac{\vec{s}_2}{t_2}; \ \vec{v}_3 = \frac{\vec{s}_3}{t_3}; \dots; \ \vec{v}_N = \frac{\vec{s}_N}{t_N}.$$

Поэтому для характеристики переменного движения понятие скорости расширяется: вводятся новые понятия "средняя скорость на участке" и "мгновенная скорость в точке".

**1.° Средняя скорость.**

Допустим, что двигаясь по прямолинейному шоссе, автомобиль за 1 ч прошел расстояние 60 км. Не вдаваясь в подробности, мы можем сказать, что автомобиль двигался со скоростью 60 км/ч. Что это за скорость? Совершенно очевидно, что автомобиль двигался неравномерно: отъезжая от остановки, он увеличивал скорость, а подъезжая к перекрестку дорог, уменьшал; кроме того, автомобиль несколько раз останавливался у светофоров. Поэтому скорость 60 км/ч — это средняя скорость движения на данном участке шоссе.

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

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

Средняя скорость движения — величина векторная. Ее направление на данном участке движения совпадает с направлением перемещения.

**2. Мгновенная скорость.**

Средняя скорость характеризует движение тела на определенном участке траектории, но не дает информацию о его движении в определенной точке траектории (в определенный момент времени). Между тем, скорость может непрерывно изменяться, а для изучения движения часто важно знать скорость именно в данный момент времени (в интересующей нас точке траектории) или, как принято говорить, важно знать *мгновенную скорость тела*.

Допустим, мы изучаем движение лыжника, съезжающего с горы (рис. 21), и нас интересует его скорость в точке $C$.

Для начала определим среднюю скорость движения лыжника на всем спуске. Для этого нам надо узнать его перемещение $\vec{s}$ и время $t$, которое он затрачивает на спуск. И то и другое можно измерить, имея часы (секундомер) и мерную ленту. Измерив перемещение $\vec{s}_1$ и время $t_1$ мы можем найти среднюю скорость лыжника на участке $A_1B_1$: $\vec{v}_1 = \frac{\vec{s}_1}{t_1}$.

Найдем скорость лыжника на участке $A_2B_2$ (точка $C$ лежит в середине этого участка). На преодоление участка $A_2B_2$ лыжник затратит время $t_2$, мы определим среднюю скорость на участке $A_2B_2$: $\vec{v}_2 = \frac{\vec{s}_2}{t_2}$.

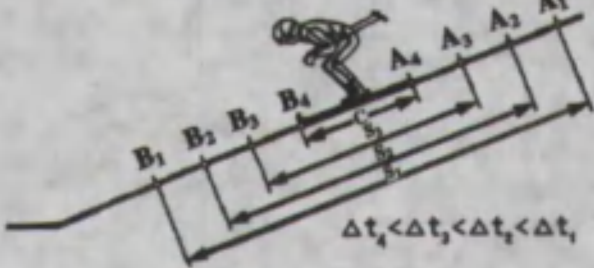



*Рис. 21*

Найдем скорость лыжника на участке $A_3B_3$ (точка $C$ лежит в середине рассматриваемого участка траектории).

Средняя скорость на этом участке равна: $\vec{v}_3 = \frac{\vec{s}_3}{t_3}$

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

Наконец, на очень малом участке $\Delta\vec{s}$, в середине которого находится точка $C$, скорость будет очень мало отличаться от скорости в точке $C$ и ее можно принять за скорость в точке $C$:

$$\vec{v}_c = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t},$$

здесь $\Delta t$ очень малый промежуток времени, в течение которого лыжник проехал очень малый участок $\Delta \vec{s}$. Таким образом, *мгновенной скоростью называют скорость в данный момент времени. Мгновенная скорость равна отношению очень малого перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение совершилось:*

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

Мгновенная скорость — величина векторная. Ее направление совпадает с направлением перемещения $\Delta \vec{s}$.

**3. Пример решения задач.**

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

**Анализ условия.** Свяжем систему отсчета с дорогой.

Движение велосипедиста в целом было неравномерным. Хотя на первой и второй половинах пути он двигался равномерно, но скорости движения были разные (рис. 22). Поэтому:

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

Кроме того, из условия задачи следует, что $t_1 = t_2 = \frac{t}{2}$, где $t$ — общее время движения.

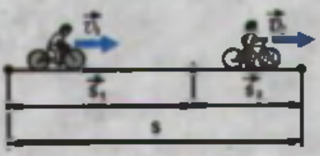



*Рис. 22*

**Решение.** Для определения средней скорости:

$$v_{ср} = \frac{s}{t}$$

необходимо найти пройденный велосипедистом путь $s$. Его можно выразить через известные величины:

$$s = s_1 + s_2 = v_1 \frac{t}{2} + v_2 \frac{t}{2} = \frac{t}{2}(v_1 + v_2).$$

Подставив найденное выражение для пути в формулу средней скорости, получим:

$$v_{ср} = \frac{s}{t} = \frac{\frac{t}{2}(v_1 + v_2)}{t} = \frac{(v_1 + v_2)}{2}.$$

**Вычисления:**

| | |
|---|---|
| $v_1 = 12$ км/ч<br>$v_2 = 4$ км/ч<br>$v_{ср} = ?$ | $v_{ср} = \frac{12 \text{ км/ч} + 4 \text{ км/ч}}{2} = 8$км/ч.<br>**Ответ:** $v_{ср} = 8$ км/ч. |

**?**

**1.** Какую скорость (среднюю или мгновенную) определяют по формуле:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} ?$$

**2.** Какую скорость (среднюю или мгновенную) измеряет спидометр автомобиля?

**3.** Автомобиль проходил каждый час 60 км. Можно ли утверждать, что его движение было равномерным?

**4.** Велосипедист ехал из одного города в другой. Половину пути он проехал со скоростью 12 км/ч, а вторую половину (из-за прокола шины) шел пешком со скоростью 4 км/ч. Определите среднюю скорость его движения. (Ответ: $v_{ср} = 6$ км/ч. Если получится результат 8 км/ч, значит, была допущена ошибка, найдите ее).

**5.*** Велосипедист ехал из одного города в другой. Половину пути он ехал со скоростью 5 м/с. Далее половину оставшегося времени он ехал со скоростью 4 м/с, а затем (из-за прокола шины) шел пешком со скоростью 1 м/с. С какой средней скоростью двигался велосипедист на всем пути? (Ответ: $v_{ср} = 3{,}3$ м/с).

## § 9. РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ПРЯМОЙ ЛИНИИ

### 1. Понятие о равнопеременном движении.

Распространенный вид неравномерного движения — равнопеременное движение. Познакомимся с ним.

Допустим, что тело движется так, что его скорость изменяется

за каждую секунду — на 16 см/с,
за каждую 1\2 с — на 8 см/с,
за каждую 1\4 с — на 4 см/с,
за каждую 1\8 с — на 2 см/с,

за каждую 1\16 с — на 1 см/с,

за каждую 1\32 с — на 0,5 см/с и т.д.

Такое движение тела называют *равнопеременным*. Этому движению можно дать следующее определение:

*Равнопеременным движением называют такое движение, скорость которого за любые равные промежутки времени изменяется на соответственно равные величины.*

**2. Примеры равнопеременного движения.**

Примером равнопеременного движения может служить скатывание легкоподвижной тележки с наклонной плоскости. Чтобы убедиться в этом, возьмем гладкую доску и укрепим по всей ее длине бумажную ленту. На доску поставим легкоподвижную тележку с ка-

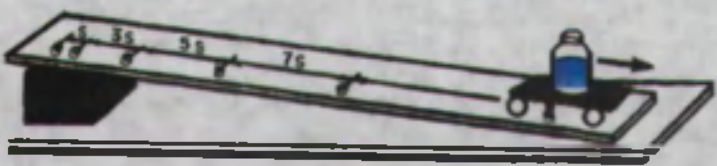



*Рис. 23*

пельницей, из которой через равные интервалы времени на бумагу капают чернила. Отпустим тележку (рис. 23). Изучим расположение капель на бумаге. Бросается в глаза, что капли располагаются неравномерно: в начале они находятся очень близко друг от друга, а затем — все дальше и дальше. Это говорит о том, что движение тележки было неравномерным: за равные интервалы времени между падениями капель тележка проходила разные расстояния.

Приняв расстояние между каплей, упавшей из неподвижной капельницы, и первой каплей, упавшей из движущейся капельницы, за условную единицу длины $s$, измерим расстояния между последующими каплями. Они окажутся: $s$; $3s$; $5s$; $7s$, $9s$; ... Из этих данных видно, что расстояния, пройденные тележкой за равные промежутки времени $\Delta t$, увеличились на одинаковую величину $2s$.

Следовательно, и скорость тележки увеличилась на

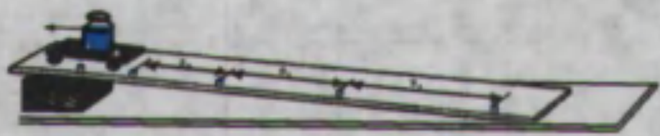


*Рис. 24*

равные величины $\frac{2s}{T}$. Из этого следует, что движение тележки было равнопеременным.

Видоизменим опыт. Толкнем тележку вверх по наклонной доске и вновь изучим расположение капель на бумаге (рис. 24). Капли расположены неравномерно: реже в начале и гуще в конце движения тележки. Это свидетельствует о том, что расстояния, пройденные тележкой за одинаковые промежутки времени, уменьшились.

Тщательное измерение расстояний, пройденных тележкой, показывает, что по мере движения тележки они уменьшались на равные значения. Следовательно, и скорость движения тележки уменьшилась равномерно. Такое движение называют *равнозамедленным*.

1. Какое движение называют равнопеременным?
2. Приведите пример равноускоренного движения.
3. Чем равноускоренное движение отличается от равнозамедленного?

## § 10. УСКОРЕНИЕ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

**1. Ускорение.**

Проделаем опыт с тележкой, на которой установлена капельница, при малом и большом углах наклона доски, и сравним следы капель на бумаге. Мы увидим, что, хотя общий характер расположения капель одинаков (в начале движения капли располагаются гуще, чем в конце; рис. 25, *a*), соответствующие расстояния между каплями во втором опыте увеличились (рис. 25, *b*).

Это свидетельствует о том, что во втором опыте скорость изменялась быстрее, чем в первом, хотя и в том, и в другом случае движение было равнопеременным. Следовательно, равнопеременные движения от-

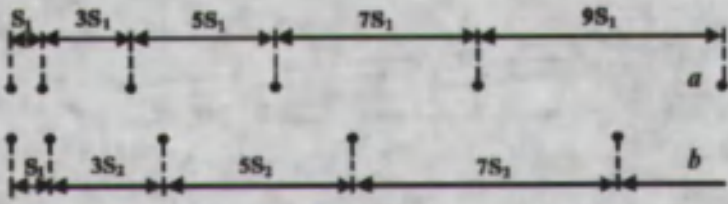



*Рис. 25*

личаются друг от друга быстротой изменения скорости. Для характеристики этого качества движения введена специальная величина — *ускорение*.

*Ускорение определяется отношением изменения скорости движения ко времени, за которое это изменение произошло.*

Допустим, что в момент времени $t_0$ тело двигалось со скоростью $\vec{v}_0$, а в момент $t$ — со скоростью $\vec{v}$, тогда ускорение движения тела, которое обозначают буквой $\vec{a}$, будет:

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0}.}$$

Обозначив векторную разность скоростей $\vec{v} - \vec{v}_0$ через $\Delta v$, а промежуток времени $t - t_0$ через $\Delta t$, формулу ускорения можно записать так:

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

Изменение скорости $\Delta \vec{v}$ — величина векторная, поэтому и ускорение $a$ — величина векторная. Направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора разности скоростей $\Delta \vec{v}$.

Суммируя сказанное выше, ускорению можно дать следующее определение:

*Ускорением называют векторную физическую величину, характеризующую скорость изменения скорости. Ускорение в равнопеременном движении равно отношению изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло:*

$$\boxed{\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.}$$

Для вычислений формулу ускорения записывают через модули входящих в нее величин:

$$a = \frac{v - v_0}{t - t_0}.$$

В том случае, когда $v > v_0$, тело движется равноускоренно. Если $v < v_0$, тело движется равнозамедленно.

**2. Единица ускорения.**

За единицу ускорения в Международной системе единиц принимается ускорение такого равноускоренного движения, при котором скорость движения тела за каждую секунду изменяется на один метр в секунду. Запишем размерность единицы ускорения:

$$[a] = \frac{1\ \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1\text{с}} = 1\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Для измерения ускорения созданы специальные приборы — акселерометры (от латинских слов "axeleratio" — ускорение и "metreo" — измерение). Существует большое число конструкций акселерометров.

**3. Пример решения задач.**

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

**Анализ условия.** Так как в условии задачи не сказано о характере движения самолета при разгоне, то будем считать его равноускоренным. Систему отсчета свяжем со взлетной полосой. Поскольку перед разгоном самолет был неподвижен, его начальная скорость $v_0 = 0$. Модуль ускорения найдем по формуле:

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

Конечную скорость надо выразить в метрах в секунду:

$$v = \frac{216\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = \frac{216000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = 60\ \text{м/с}.$$

**Решение:**

| | |
|---|---|
| $v_0 = 0$<br>$v = 60$ м/с<br>$t = 25$ с | $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t}$. |
| | $a = \dfrac{60\ \text{м/с}}{25\ \text{с}} = 2{,}4\ \text{м/с}^2$. |
| $a = ?$ | **Ответ:** $a = 2{,}4$ м/с$^2$. |

?

1. Дайте определение ускорения движения.
2. В каких единицах выражают ускорение и какими приборами его измеряют?

## § 11. СКОРОСТЬ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

При расчетах, связанных с равнопеременным движением, как и с любыми переменными движениями, используют понятия средней и мгновенной скоростей.

**1. Мгновенная скорость равнопеременного движения.** Из формулы ускорения легко определить мгновенную скорость в любой момент времени. Поскольку:

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

то:

$$\boxed{v = v_0 \pm at.}$$

Пользуясь приведенной формулой, следует иметь в виду, что знак «+» означает равноускоренное движение, а знак «—» равнозамедленное.

Из формулы $v = v_0 + at$ видно, что мгновенная скорость равнопеременного движения линейно зависит от времени движения.

Графически эта зависимость изображается прямой линией, которая пересекает ось скорости в точке, отстоящей от начала координат на расстоянии, равном начальной скорости.

На рис. 26 приведены четыре графика скорости: график $A$ соответствует равномерному движению, график $B$ — равноускоренному движению при $v_0 = 0$, график $C$ — равноускоренному движению с начальной скоростью при $v_0 = 0$ и, наконец, график $D$ — равнозамедленному движению.

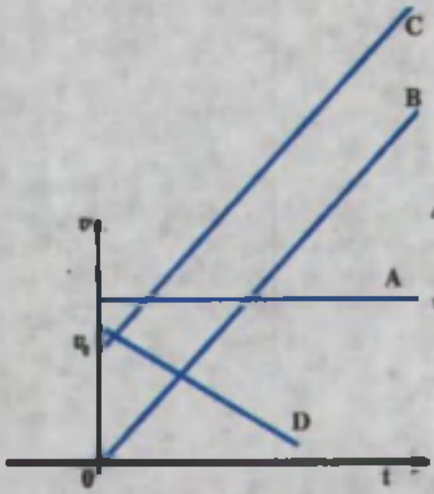



Рис. 26

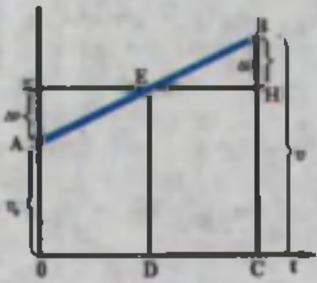



Рис. 27

**2. Средняя скорость равнопеременного движения.** График скорости равнопеременного движения, отрезки координат *OA* и *OC* вместе с ординатой конечной скорости образуют трапецию *OABC* (рис. 27). Проведем в этой трапеции среднюю линию *DE*. Через точку *E* проведем отрезок *KH*, параллельный оси времени.

Непосредственно из рисунка видно, что скорость в точке *E* больше начальной скорости $v_0$ на $\Delta v$ и на $\Delta v$ меньше конечной скорости $v$. Следовательно, скорость в точке *E* — это средняя скорость $v_{ср}$ движения за время $t$.

Из курса геометрии вы знаете, что средняя линия трапеции равна полусумме оснований:

$$ED = \frac{OA + BC}{2}, \text{ или } v_{ср} = \frac{v + v_0}{2}.$$

Этой формулой можно пользоваться для нахождения средней скорости только при равнопеременном движении, а формула $v_{ср} = \frac{s}{t}$ применима для любого переменного движения.

**3. Пример решения задачи.**

Автомобиль двигался со скоростью 54 км/ч. Увидев красный свет светофора, шофер на участке в 50 м снизил скорость автомобиля до 18 км/ч. Определите ускорение, с которым двигался автомобиль.

**Анализ условия.** Систему отсчета свяжем с дорогой. За начало отсчета возьмем точку, в которой началось торможение. Движение автомобиля будем считать равнозамедленным. Ускорение, с которым двигался автомобиль, можно определить по формуле:

$a = \dfrac{v - v_0}{t}$, время торможения: $t = \dfrac{s}{v_{ср}}$, а среднюю скорость: $v_{ср} = \dfrac{v + v_0}{2}$.

Начальную и конечную скорость надо выразить в метрах в секунду.

**Решение.**

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{v - v_0}{s/v_{ср}} = \frac{(v - v_0)\, v_{ср}}{s} = \frac{(v - v_0)\dfrac{v + v_0}{2}}{s};$$

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}.$$

**Вычисления.**

$v_0 = 15$ м/с
$v = 5$ м/с
$s = 50$ м

$a = ?$

$$a = \frac{(5\ \text{м/с})^2 - (15\ \text{м/с})^2}{2 \cdot 50\ \text{м}} = \frac{25 - 225}{100}\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = -2\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

**Ответ:** $a = -2$ м/с$^2$.

**Примечание.** В ходе решения этой задачи была получена формула:

$$\boxed{a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}.}$$

Постарайтесь запомнить вывод этой формулы.

1. Выведите и объясните формулу конечной скорости равнопеременного движения.
2. Выведите и объясните формулу средней скорости равнопеременного движения.
3. Автомобиль трогается с места и, двигаясь равноускоренно, через 1 мин развивает скорость 54 км/ч. Определите ускорение, с которым он двигался, пройденное им расстояние и среднюю скорость движения. (Ответ: $a = 0,25$ м/с$^2$; $s = 450$ м; $v_{ср} = 7,5$ м/с).

## § 12. ПУТЬ ТЕЛА ПРИ РАВНОПЕРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ

**1. Формула пути.**

Путь, пройденный телом при равнопеременном движении за время $t$, можно подсчитать по формуле:

$$s = v_{ср}t\,.$$

Средняя скорость равнопеременного движения равна: $v_{ср} = \dfrac{v_0 + v}{2}$. Подставив конечную скорость $v = v_0 + at$ в формулу средней скорости, получим:

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

Подставим это значение средней скорости в формулу пути:

$$s = \frac{2v_0 + at}{2} \cdot t = v_0t + \frac{at^2}{2} \quad \text{или} \quad \boxed{s = v_0t \pm \frac{at^2}{2}}.$$

Пользуясь этими формулами, следует помнить, что знак ускорения «+» означает равноускоренное движение, а знак «–» равнозамедленное движение.

В том случае, когда тело трогается с места, его начальная скорость равна нулю, поэтому пройденный путь:

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

**2. График пути равноускоренного движения.**

Формула $s = v_0t \pm \dfrac{at^2}{2}$ аналогична формуле $y = bx + cx^2$, которую вы изучали в геометрии ($t$ соответствует $x$,

$v_0 - b$, $\frac{a}{2} - c$, $s - y$). Графически такая зависимость изображается параболой. Следовательно, график зависимости пути от времени — парабола.

Чтобы построить график пути, надо найти для нескольких значений времени значения пройденного пути, изобразить точки, ординаты которых равны этим значениям, и соединить точки между собой.

В качестве примера построим график пути равноускоренного движения с начальной скоростью 0,1 м/с и ускорением 0,2 м/с$^2$. Для этого вычислим пути, проходимые телом за 1 с, 2 с, 3 с и т.п. Результаты вычислений запишем в таблицу.

| Время, с | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Путь, м | 0 | 0,2 | 0,6 | 1,2 | 2 | 3 | 4,2 | 5,6 | 7,2 | 9 |

**Построим график на основании данных (рис. 28).**

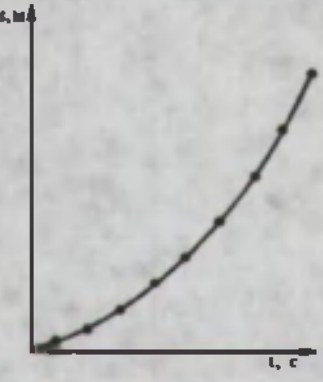


*Рис. 28*

**3. Пример решения задачи.**

Автомобиль, двигавшийся со скоростью 36 км/ч, на участке дороги с уклоном стал двигаться с ускорением 0,1 м/с$^2$. В конце уклона скорость его движения достигла 54 км/ч. Какова была длина уклона?

**Анализ условия.** Систему отсчета свяжем с дорогой. За начало отсчета возьмем начало спуска. Длина уклона равна той части пути автомобиля, на которой его скорость возросла до 54 км/ч:

$$l = s = v_{ср}t. \text{ Но } v_{ср} = \frac{v_0 + v}{2}.$$

Время движения можно найти из формулы конечной скорости $v = v_0 + at$: $t = \frac{v - v_0}{a}$.

Начальную и конечную скорости надо выразить в метрах в секунду:

$$v_0 = \frac{36\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = \frac{36\,000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = 10\ \text{м/с};$$

$$v = \frac{54\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = \frac{54\,000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = 15\ \text{м/с}.$$

**Решение.**

$$l = s = v_{ср} t = \frac{v_0 + v}{2} \cdot \frac{v - v_0}{a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a};\ l = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $v_0 = 10$ м/с<br>$a = 0{,}1$ м/с$^2$<br>$v = 15$ м/с | $$l = \frac{225\ \text{м}^2/\text{с}^2 - 100\ \text{м}^2/\text{с}^2}{0{,}2\ \text{м/с}^2} = 625\ \text{м}.$$ |
| $l = ?$ | **Ответ:** $l = 625$ м. |

**Примечание.** Прием, с помощью которого была получена формула:

$\boxed{s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}}$, вы уже применяли при решении задачи в §11. Этот прием следует запомнить.

**?**

1. Выведите формулу пути равнопеременного движения.
2. Определите, пользуясь рис. 26, ускорение движения.
3. При подходе к станции машинист электровоза выключил двигатели, после чего поезд стал двигаться равнозамедленно с ускорением 0,1 м/с$^2$. Какое расстояние пройдет состав до остановки, если в момент отключения двигателя скорость поезда была 54 км/ч? (Ответ: $s = 1125$ м).

## §13. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ – ПРИМЕР РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

В предыдущих параграфах вы познакомились с равнопеременным движением и с величинами, его характеризующими. Вы узнали, что тележка скатывается по наклонной плоскости равноускоренно, а подни-

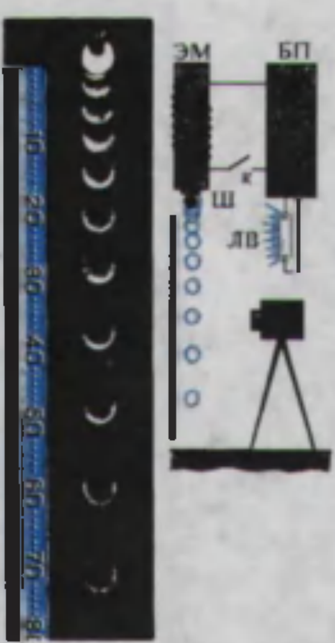



*Рис. 29*

мается — равнозамедленно. Рассмотрим еще один пример равноускоренного движения.

**1. Свободное падение тел.** Свободным падением называют падение тел в вакууме, когда их движению не мешает воздух. Изучение свободного падения можно проводить на опыте с падением достаточно массивного стального шарика в воздухе. Конечно, воздух будет оказывать движению шарика сопротивление, но, как показывают наблюдения, если шарик массивный, это сопротивление заметно не влияет на его движение и им можно пренебречь.

Изучение свободного падения тел производилось разными способами с помощью различных экспериментальных установок. Одна из них изображена на рис. 29. В этой установке падение стального шарика *Ш* происходит на фоне миллиметровой бумаги в хорошо затемненной лаборатории.

В начале опыта шарик удерживался электромагнитом *ЭМ*. Электромагнит был подключен к специальному блоку питания *БП*, к которому была присоединена также лампа-вспышка *ЛВ*, загорающаяся через каждые 0,1 с. Устройство блока питания таково, что, пока включен электромагнит, лампа-вспышка не работала. После подготовки установки к работе в лаборатории выключался свет и открывался объектив фотоаппарата. Затем ключом *К* установка включалась.

Так как объектив фотоаппарата был все время открыт, а шарик освещался прерывистым светом, то на снимке фиксировались (на фоне миллиметровой бумаги) положения падающего шарика через 0,1 с. На рис. 29 слева показана уменьшенная копия такого снимка.

Измерив расстояния между центрами изображений шарика на фотографии, можно обнаружить, что шарик за последовательные промежутки времени, равные 0,1 с, пролетал следующие расстояния:

| Интервал времени, с | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Пройденное за этот интервал расстояние, см | 4,9 | 14,7 | 24,5 | 34,3 | 44,4 |

Если расстояние, пройденное за первый интервал времени, принять за единицу, то последующие расстояния будут равны 3, 5, 7, 9. Такое же соотношение расстояний было при равноускоренном движении тележки по наклонной плоскости. Следовательно, падение шарика равноускоренное.

**2. Ускорение свободного падения.**

Найдем ускорение падения шарика. Начальная скорость шарика равна нулю, поэтому ускорение можно вычислить используя формулу $s = \frac{at^2}{2}$. Из этой формулы следует, что $a = \frac{2s}{t^2}$.

Подставив значения времени и пути, получим:

$$a = \frac{2 \cdot 4{,}9 \text{ см}}{(0{,}1 \text{ с})^2} = 980 \text{ см/с}^2.$$

**Задание.** Вычислите ускорение свободного падения шарика на расстояниях, пройденных телом за 0,2 с, 0,3 с, 0,4 с и 0,5 с.

Вычисления показали, что шарик падал с одинаковым ускорением, равным 980 см/с$^2$ = 9,8 м/с$^2$. Если в *нашем опыте взять шарик большего размера*, он падал бы точно так же, как и маленький шарик. Его ускорение тоже было бы 9,8 м/с$^2$.

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

$$\boxed{g = 9{,}8 \text{ м/с}^2.}$$

**?**

1. Из каких факторов следует, что свободное падение тел — движение равноускоренное?
2. Тело брошено вертикально вверх со скоростью $v_0$. С какой скоростью тело упадет на землю? Ответ обосновать.
3. Докажите, что время подъема тела, брошенного вертикально вверх, равно времени его падения.

## §14. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

### *Лабораторная работа № 1*

***Цель работы:*** измерить ускорение, с которым шарик скатывается по наклонному желобу; научиться анализировать экспериментальное задание.

***Необходимые приборы и материалы:*** металлический желоб, стальной шарик, секундомер, штатив с принадлежностями, стальной цилиндр, мерная лента.

Экспериментальная установка изображена на рис. 30. Если шарику не сообщать начальной скорости, то его движение вниз по желобу можно описать уравнением:

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

Измерив пройденное шариком расстояние $s$ и время движения $t$, можно вычислить ускорение:

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

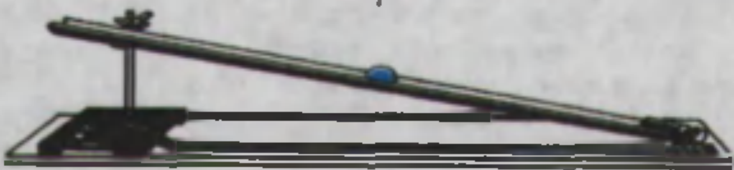


*Рис. 30*

**Порядок выполнения работы.**

1. Соберите установку, изображенную на рис. 30.

2. Дождавшись, когда стрелка секундомера совпадет с нулевым (или другим заметным) делением, отпустите шарик и отметьте время $t$ до его удара о цилиндр, установленный в конце желоба.

3. Измерив пройденное шариком расстояние $s$, вычислите ускорение, с которым он скатывался, по формуле:

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

4. Повторите опыт 5-6 раз.

5. Определите погрешность найденного значения ускорения.

6. Запишите результат проведенного измерения в виде:

$$a = (a_{ср} \pm \Delta a)\ см/с^2,$$

где $a_{ср}$ – найденное значение ускорения.

**О точности проведенного измерения.**

В проведенной вами работе относительная погрешность ускорения равна:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta s}{s} + 2\frac{\Delta t}{t}.$$

Погрешность измерения времени взята дважды. Это сделано потому, что время возводилось в квадрат.

Оценим относительную погрешность одного измерения для случая, когда $s = (100 \pm 0{,}5)$ *см* и $t = (10 \pm 1)$ *с*.

Относительная погрешность измерения пути равна:

$$\frac{\Delta s}{s} = \frac{\pm 0{,}5 см}{100 см} = 0{,}005 = 0{,}5\%.$$

Относительная погрешность измерения времени в этом случае равна:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{\pm 1 с}{10 с} = \pm 0{,}1 = 10\%.$$

Мы видим, что точность результата, в основном, зависит от точности измерения времени. Для того, чтобы повысить точность измерения времени, надо брать длинный желоб (чтобы шарик скатывался дольше) и провести несколько измерений, по результатам которых взять среднее значение. Относительная погрешность измерения ускорения равна:

$$\frac{\Delta a}{a} = \pm (0,005 + 2 \cdot 0,1) = \pm 0,205 \approx \pm 0,2.$$

По результатам опыта:

$$a = \frac{2м}{100с^2} = 0,02 \text{ м/с}^2.$$

Найдем абсолютную погрешность определения ускорения: $\frac{\Delta a}{a} = \pm 0,2$, отсюда $\Delta a = \pm 0,2 \cdot a$, или

$$\Delta a = \pm 0,2 \cdot 0,02 \text{ м/с}^2 = \pm 0,004 \text{ м/с}^2.$$

Значение ускорения, вычисленное по результатам опыта, надо записать так:

$$a = 0,02 \frac{м}{с^2} \pm 0,004 \frac{м}{с^2} = (0,02 \pm 0,004) \frac{м}{с^2}.$$

Эта запись означает, что значение ускорения может быть $0,02 \frac{м}{с^2} + 0,004 \frac{м}{с^2} = 0,024 \frac{м}{с^2}$ и может быть $0,02 \frac{м}{с^2} - 0,004 \frac{м}{с^2} = 0,016 \frac{м}{с^2}$. Иными словами, значение ускорения находится в интервале от 0,016 до 0,024 м/с$^2$ (рис. 31) и может быть любым, оставаясь внутри этого интервала (например, 0,017 м/с$^2$, 0,020 м/с$^2$).


*Рис. 31*

### *Упражнение 3*

**1.** Автомобиль трогается с места и движется равноускоренно по прямой линии так, что через 15 с достигает скорости 54 км/ч. Определите ускорение движения автомобиля и пройденное им расстояние (Ответ: $a = 1$ м/с$^2$; $s = 1,1 \cdot 10^2$ м).

**2.** Автомобиль движется со скоростью 72 км/ч. Увидев на перекрестке желтый свет, шофер тормозит. Через 5 с автомобиль останавливается. Вычислите тормозной путь автомобиля и ускорение его движения.

(Ответ: $s = 50$ м; $a = -4{,}0$ м/с$^2$).

**3.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью 20 м/с. На какую наибольшую высоту оно поднимается и через сколько секунд упадет на землю?

(Ответ: $H \approx 20{,}4$ м; $t \approx 4{,}1$ с).

**4.** Сигнальная ракета вылетает из ракетницы вертикально вверх со скоростью 200 м/с. Считая, что ракета поднимается равнозамедленно с ускорением, модуль которого равен $g = 10$ м/с$^2$, определите максимальную высоту ее подъема. (Сопротивление воздуха не учитывать).

(Ответ: $H = 2$ км).

**5.** Брошенное вверх тело пролетело мимо окна со скоростью 18,9 м/с. С какой скоростью оно будет пролетать мимо того же окна вниз? (Считать вектор скорости направленным вверх.)

(Ответ: $v = 18{,}9$ м/с).

**6.** Как двигались тела, графики движения которых приведены на рис. 32?

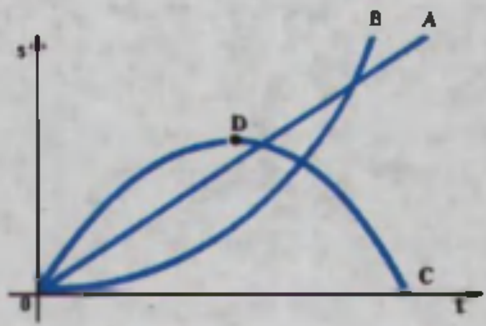



*Рис. 32*

**7*.** Воздушный шар поднимается вертикально с постоянной скоростью 1 м/с. По неосторожности с него уронили небольшой предмет, когда шар находился на высоте 180 м над поверхностью Земли. Найдите расстояние между воздушным шаром и предметом через 2 с и 10 с после падения тела. (Ответ: $s_1$ = 19,6 м; $s_2$ = 190 м).

**8*.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью $v_0$. Когда оно достигло максимальной высоты, из той же точки, с той же начальной скоростью, бросили второе тело. Считая, что движения происходят с ускорением 10 м/с², определите, на какой высоте от точки бросания встретятся тела.

$$\left(\text{Ответ: } h = \frac{1}{8} \cdot \frac{v_0^2}{g}\right).$$

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ II

1. Один из наиболее распространенных видов движения — неравномерное движение, при котором скорость движения изменяется.

2. Равнопеременным движением называют движение с постоянным по модулю ускорением.

Примерами равнопеременного движения могут служить: движение тела, брошенного вертикально вверх, и свободное падение тела, а также свободное движение тела вниз и вверх по наклонной плоскости.

3. Для характеристики неравномерного движения используют понятие средней скорости на данном участке траектории:

$$\vec{v}_{ср} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

Средняя скорость равнопеременного движения может быть определена по формуле:

$$v_{ср} = \frac{v_0 + v}{2}.$$

4. Главной особенностью переменного движения является изменение скорости. Для характеристики этого свойства движения введена специальная величина — ускорение. Ускорением называют векторную величину, характеризующую быстроту изменения скорости.

Ускорение равнопеременного движения равно отношению изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}.$$

Направление вектора ускорения $\vec{a}$ совпадает с направлением вектора изменения скорости $\Delta v$.

5. Мгновенная скорость равнопеременного прямолинейного движения:

$$\vec{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}; \quad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

6. Расстояние, пройденное телом при прямолинейном равнопеременном движении, вычисляют по формуле: $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$, называемой уравнением движения.

# Глава III. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

До сих пор вы изучали прямолинейные движения; их траектории — прямые линии. Но гораздо чаще движения происходят по кривым линиям.

Так, кончик пера вашей ручки при письме движется по кривым линиям; тело, брошенное под углом к горизонту, также движется по криволинейной траектории; по кривой линии движутся автомобили при переезде с одной дороги на другую, все космические тела и т.д.

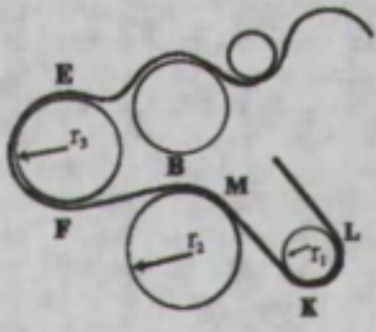


Рис. 33

Изучить все виды криволинейных движений невозможно, да и нет в этом необходимости. Почти любое криволинейное движение можно представить как последовательность движений, происходящих по дугам окружностей (рис. 33).

Поэтому мы сначала изучим движение материальной точки по окружности, а полученные закономерности будем (если это возможно) применять и к другим видам криволинейных движений.

## §15. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Примерами движения тела по окружности могут служить:

а) движение искусственного спутника, вращающегося вокруг Земли по круговой орбите (рис. 34, *a*);

б) движение какой-либо точки на вращающемся теле (рис. 34, *b*).


*Рис. 34*

**1. Угловое перемещение.** Допустим, что материальная точка движется равномерно по окружности и в момент $t_1$ находится в положении $A$ (рис. 35), в момент $t_2$ точка заняла положение $B$. Радиус, проведенный из центра окружности к материальной точке, за это время описал угол φ, который называют *угловым перемещением*.

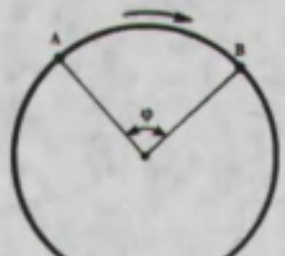



*Рис. 35*

Угловое перемещение в Международной системе единиц выражают в радианах.

Радиан — центральный угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу. Его сокращенное обозначение — 1 рад.

**2. Частота обращения и период обращения.** Для характеристики равномерного движения точки по окружности введены две специальные величины: частота и период обращения.

*Частотой обращения называют число оборотов материальной точки вокруг центра обращения за секунду.* Частоту обращения принято обозначать греческой буквой $\nu$ (ню):

$$\boxed{\nu = \frac{N}{t}},$$

где $N$ - число оборотов, совершенных за время $t$.

● За единицу частоты в Международной системе единиц принят 1 оборот в секунду. Его сокращенное обозначение — 1 $c^{-1}$.

*Периодом обращения называют время, в течение которого совершается один оборот точки по окружности.* Период обозначают буквой $T$:

$$\boxed{T = \frac{t}{N}}.$$

● За единицу периода в Международной системе единиц принята секунда — 1 с.

Нетрудно заметить, что период и частота — величины взаимно обратные:

$$\boxed{\nu = \frac{1}{T}} \quad \text{и} \quad \boxed{T = \frac{1}{\nu}}.$$

**3. Угловая скорость.** Движение тела по окружности характеризуют с помощью угловой скорости, которая равна отношению углового перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение совершено.

● *Угловую скорость* принято обозначать греческой буквой $\omega$ (омега):

$$\boxed{\omega = \frac{\varphi}{t}}.$$

Движение, при котором материальная точка движется по окружности с постоянной угловой скоростью, называют *равномерным движением по окружности*.

За единицу угловой скорости в Международной системе единиц принята скорость такого равномерного движения тела по окружности, при котором в каждую секунду совершается угловое перемещение в 1 радиан.

Эта единица угловой скорости называется *радиан в секунду* и обозначается 1 рад.

Угловое перемещение $\varphi$ тела за период $T$ равно $2\pi$.

Поэтому угловая скорость $\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}}$, или, учтя, что $T = \frac{1}{\nu}$, получим $\boxed{\omega = 2\pi\nu.}$

**?**

1. Что такое угловое перемещение?
2. Дайте определение периода и частоты обращения.
3. Напишите формулу угловой скорости, объясните значение входящих в нее величин.
4. Определите угловую скорость обращения секундной стрелки часов.

## § 16. ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ РАВНОМЕРНО ПО ОКРУЖНОСТИ

В предыдущем параграфе для характеристики движения тела по окружности были введены две величины — угловое перемещение и угловая скорость. Однако к движению тела по окружности применимо и понятие скорости, ранее введенное для характеристики прямолинейного движения. В случае движения тела по окружности ее называют линейной скоростью.

**1. Линейная скорость.**

Допустим, что материальная точка равномерно движется по окружности радиусом $R$ (рис. 36). Так как движение точки равномерное, то модуль скорости постоянен. Например, за очень малое время $\Delta t$ точка переместилась из положения $A_1$ в положение $B_1$ (на рис. 36 для наглядности перемещение $A_1B_1$ показано увеличенным).

Тогда по общему определению скорости линейная скорость на участке $A_1B_1$ равна:

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


Рис. 36

и направлена вдоль хорды $A_1B_1$. Так как хорда при уменьшении промежутка времени $\Delta t$ все более приближается к дуге, то вектор скорости в середине участка $A_1B_1$ (в точке $C$) направлен по касательной к дуге. Следовательно, и мгновенная скорость в любой другой точке окружности направлена по касательной. В этом можно убедиться, если прижать к вращающемуся точильному камню конец стального прутка. Раскаленные частицы, отрывающиеся от камня и летящие с той скоростью, которой они обладали в момент отрыва, будут видны в виде искр. Направление вылета искр всегда совпадает с касательной к окружности в той точке, где пруток касается камня (рис. 37, *a*). По касательной к окружности движутся и брызги от колес буксующего автомобиля (рис. 37, *b*).

Таким образом, *линейная скорость тела, движущегося по окружности, оставаясь постоянной по модулю, непрерывно изменяется по направлению и в любой точке направлена по касательной к траектории.*

*a*

*b*

Рис. 37

Так как модуль линейной скорости постоянен, то его можно определить по формуле $v = \frac{s}{t}$. За один оборот ($t = T$) тело пройдет расстояние, равное длине окружности: $s = 2\pi R$. Поэтому:

$\boxed{v = \frac{2\pi R}{T}}$, или учтя, что $T = \frac{1}{\nu}$, $\boxed{v = 2\pi R\nu.}$

**2. Соотношение между угловой и линейной скоростями.**

Найдем отношение линейной скорости к угловой:

$$\frac{v}{\omega} = \frac{2\pi R\nu}{2\pi\nu} = R.$$

Таким образом, $\boxed{v = \omega R}$ и $\boxed{\omega = \frac{v}{R}.}$

**3. Пример решения задачи.**

Время одного оборота Земли вокруг оси равно 24 ч. Вычислите угловую и линейную скорости вращения точек на экваторе. (Радиус Земли считать равным 6400 км).

**Анализ условия.** Вращение Земли вокруг оси будем считать равномерным. Тогда $v = \omega R$, а $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Время $t$ выразим в секундах: $t = 3600\ с \cdot 24 = 86400\ с$.

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $R = 64 \cdot 10^5$ м<br>$T = 86400$ с | $\omega = \frac{6{,}28\ рад}{86400\ с} = 0{,}00007$ рад/с; |
| $\omega = ?$<br>$v = ?$ | $v = 0{,}00007 \cdot 64 \cdot 10^5\ м = 448$ м/с. |

**Ответ:** $v = 448$ м/с;
$\omega = 7 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Рис. 38

?

1. Какая скорость называется линейной? Напишите формулу линейной скорости и объясните как она направлена.
2. Найдите соотношение между линейной и угловой скоростями.

3. Какова линейная скорость конца минутной стрелки часов на Спасской башне Кремля (рис. 38), если известно, что ее длина 3,27 м? (Ответ: $v = 5,7 \cdot 10^{-3}$ м/с).

## §17. УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ

При равномерном движении тела по окружности его линейная скорость, оставаясь постоянной по модулю, непрерывно изменяется по направлению. Но изменение скорости по направлению свидетельствует о том, что при равномерном движении тела по окружности есть ускорение. Это ускорение получило название *центростремительного*.

**1. Центростремительное ускорение.** По определению (см. §10) ускорение характеризует быстроту изменения скорости и равно отношению изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло, а его направление совпадает с направлением вектора изменения скорости:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}, \text{ или в скалярной форме } a = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Чтобы найти центростремительное ускорение, допустим, что тело, равномерно движущееся по окружности, в момент времени $t$ находилось в точке $A$ (рис. 39), а через очень малый промежуток времени $\Delta t$ переместилось в очень близко расположенную точку $B$ (на рисунке расстояние $AB$ для наглядности показано увеличенным). Скорость в точке $A$ обозначим $\vec{v}_A$, а в точке $B$ - $\vec{v}_B$. Модули скорости в точках $A$ и $B$ одинаковы.

Найдем изменение скорости за время $\Delta t$:

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A.$$

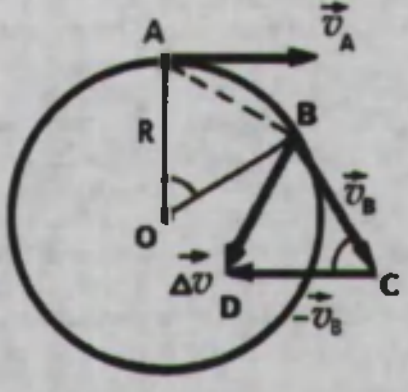



Рис. 39

Для этого вычтем (по правилу треугольника) из вектора $v_B$ вектор $v_A$.

Рассмотрим образовавшиеся треугольники $AOB$ и $BCD$. Эти треугольники подобны, так как они равнобедренные $OA = OB = R$ и $BC = BD = v$ и имеют равные углы: $\angle AOB = \angle BCD$ (углы с перпендикулярными сторонами). Поэтому:

$$AB : AO = BD : DC$$

Но хорда AB очень мала и ее можно заменить дугой $\breve{AB}$ : $AB = \breve{AB} = v\Delta t$. Кроме того, $AO = R$, $BD = \Delta v$ и $BC = v$.

Следовательно, $\frac{v\Delta t}{R} = \frac{\Delta v}{v}$, откуда $\Delta v = \frac{v^2\Delta t}{R}$, а ускорение:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2\Delta t}{R\Delta t} = \frac{v^2}{R};$$

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

Для того, чтобы определить направление ускорения, вспомним, что $AB$ очень мало. Но чем меньше $AB$, тем ближе вектор $\Delta\vec{v}$ подходит к радиусу $OB$ и в пределе совпадает с ним. Следовательно, вектор $\Delta\vec{v}$ и ускорение $a$ направлены по радиусу к центру окружности. Поэтому ускорение называют *центростремительным*.

Таким образом, *при равномерном движении тела (материальной точки) по окружности ускорение в любой точке траектории перпендикулярно скорости движения и направлено к центру окружности. Модуль его равен частному от деления квадрата линейной скорости на радиус вращения.*

● *Часто центростремительное ускорение называют нормальным* (т.е. перпендикулярным к скорости).

**2. Пример решения задачи.**

Автомобиль движется по закруглению радиусом 100 м со скоростью 36 км/ч. Определите его центростремительное ускорение.

**Анализ условия.** Центростремительное ускорение находим по формуле $a = \frac{v^2}{R}$. Скорость автомобиля выразим в метрах в секунду:

$$v = \frac{36\ \text{км}}{1\ \text{ч}} = \frac{36\,000\ \text{м}}{3600\ \text{с}} = 10\ \text{м/с}.$$

**Решение.**

| | |
|---|---|
| $R = 100$ м<br>$v = 10$ м/с | $a = \frac{(10\ \text{м/с})^2}{100\ \text{м}} = 1\ \text{м/с}^2.$ |
| $a = ?$ | **Ответ:** $a = 1$ м/с$^2$. |

1. Какое ускорение называют центростремительным?
2. Выведите формулу центростремительного ускорения.
3. Самолет, выходя из пике, движется по траектории, которая в нижней части является дугой окружности радиусом 800 м. Вычислите ускорение самолета при его движении по дуге окружности, если его скорость равна 720 км/ч. (Ответ: $a = 50$ м/с$^2$).

### *Упражнение 4*

**1.** Спортсмен бежит равномерно по окружности радиусом $R$ со скоростью $v$. Постройте график зависимости пути спортсмена от времени.

**2.** Спутник движется по круговой орбите на высоте 630 км. Период обращения спутника 97,5 мин. Определите его линейную скорость и центростремительное ускорение. Радиус Земли 6370 км. (Ответ: $v = 7514$ м/с; $a = 8{,}1$ м/с$^2$).

**3.** Тело движется по дуге окружности радиусом 50 м. Определите линейную скорость движения тела и пройденный им путь, если известно, что его угловое перемещение за 10 с равно 1,57 рад. (Ответ: $v = 7{,}85$ м/с; $s = 78{,}5$ м).

**4.** Определите угловую скорость и угловое перемещение тела за 10 с, если период его обращения равен 10 с. (Ответ: $\omega = 0{,}628$ рад/с; $\varphi = 6{,}28$ рад).

**5.** Вычислите центростремительное ускорение Луны, если известно, что она совершает один оборот вокруг Земли за

27,3 сут., а расстояние от нее до Земли равно 60 земным радиусам. (Ответ: $a = 2,73 \cdot 10^{-3}$ м/с$^2$).

**6.** Вычислите отношение ускорения свободного падения на поверхности Земли и центростремительного ускорения Луны. Радиус орбиты Луны равен 60 земным радиусам. (Ответ: 3600).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ III

1. При равномерном движении по прямой линии скорость остается постоянной и по модулю, и по направлению, а ускорение отсутствует.

2. При равномерном движении по окружности скорость постоянна по модулю и непрерывно изменяется по направлению. Ускорение при этом (центростремительное ускорение) также постоянно по модулю $\left(a = \frac{v^2}{R}\right)$, но непрерывно изменяется по направлению и всегда направлено к центру окружности.

# ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

Динамика (от греческого слова "динамис" — сила) — раздел механики, в котором изучается движение тел в связи с их взаимодействием с другими телами.

Динамика объясняет, при каких условиях тело движется так, а не иначе, когда тело движется равномерно и когда равноускоренно, когда тело движется прямолинейно и когда криволинейно.

Основой динамики являются законы движения тел, сформулированные английским физиком Исааком Ньютоном в его работе "Математические начала натуральной философии", опубликованной более 300 лет тому назад, в 1687 г.[1]. Этот труд содержал основные понятия (масса, сила, количество движения, ускорение), три закона механики, закон всемирного тяготения.

И. Ньютон, изучив работы своих предшественников в области механики и проведя собственные исследования, ввел основные понятия механики (масса, сила, импульс и др.) и с их помощью сформулировал три закона движения, которые получили название законов Ньютона.

Из курса истории вы знаете, что в Англии XVII в. — это век буржуазной революции. Гражданская война, казнь короля, установление республики, реставрация королевской власти, переворот 1688 г., завершивший буржуазную революцию в Англии, - таковы главнейшие политические события, свидетелем которых был Ньютон.

При жизни Ньютона происходил переход от феодального строя к капиталистическому. В этот период в

[1]В средние века физику называли натуральной философией. От латинского слова natura — природа и греческих слов "филео" — любовь и "софия" — мудрость.

различных отраслях промышленности стали появляться сравнительно сложные механизмы и устройства (насосы, грузоподъемники, рудодробилки, кузнечные молоты и т.д.). Бурно развивающаяся техника требовала решения ряда научных проблем, в первую очередь, в механике. Эту работу в значительной мере и выполнил И. Ньютон.

И. Ньютон видел в науке важный способ совершенствования производства. Он писал: "Если дети будут хорошо обучены и воспитаны опытными учителями, то со временем народ получит более умелых моряков, кораблестроителей, архитекторов, инженеров и лиц всевозможных математических профессий для работы как на море, так и на суше".

Эти слова ученого не потеряли своего значения и в наше время. Изучая основы динамики, вы должны овладеть ее основными понятиями и законами, научиться решать задачи и, что особенно важно, знать применение законов динамики в технике. Это поможет вам в дальнейшем понять принцип устройства и работы тех машин и механизмов, с которыми придется иметь дело на производстве, в армии и быту.

# Глава IV. ДВИЖЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ

В окружающем нас мире все находится в непрерывном движении и изменении. Движение — неотъемлемое свойство материи. Нет и не может быть материи без движения и движения без материи. Но, двигаясь, тела встречаются друг с другом и взаимодействуют.

В результате взаимодействия движение тел может измениться. Например, стальной шар, равномерно двигавшийся по прямой линии, при взаимодействии с магнитом начинает двигаться по криволинейной траектории. Спортсмен, прыгая в воду, сначала летит в воздухе ускоренно, а попав в воду, в результате взаимодействия с ней, движется замедленно.

Для того, чтобы глубже понять законы движения, надо изучить взаимодействие тел друг с другом, ибо *взаимодействие*, так же, как и движение, - ***неотъемлемое свойство материи.***

Взаимодействие — явление сложное. Мы сначала рассмотрим наиболее простые, знакомые из повседневной жизни, случаи взаимодействия, причем проанализируем лишь самые простые их стороны, а затем по мере накопления знаний перейдем к изучению более сложных взаимодействий.

## §18. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. СИЛА

**1. Сила.** Взаимодействие тел может происходить по-разному. Например, одну и ту же пружину ребенок растянет меньше, чем взрослый человек.

Для характеристики взаимодействия тел в физике введена особая величина — сила. Понятие силы первоначально применялось для описания мускульных усилий человека. Для того, чтобы поднять тушу убитого животного, вытянуть из воды рыбу, сдвинуть или убрать камень, человеку приходилось по-разному напрягать свои мышцы. Так из повседневного опыта возникли первые представления о мере взаимодействия человека с окружающими его телами, представления о силе.

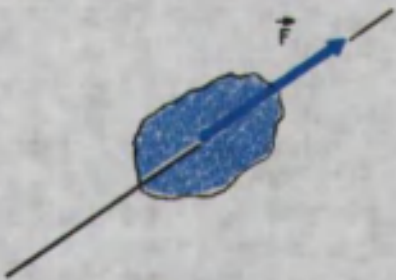


*Рис. 40*

Позже понятие силы перешло в науку. Оно используется для характеристики взаимодействия тел.

Так как при взаимодействии тел может изменяться скорость движения, то силе приписывают направление, совпадающее с направлением ускорения, которое получает тело в результате взаимодействия. Прямую линию, вдоль которой действует сила, называют линией действия силы (рис. 40).

Таким образом, *силой называют векторную физическую величину, характеризующую механическое действие одного тела на другое и являющуюся мерой этого действия.*

Как вам известно из курса физики VI класса, единицу силы в Международной системе единиц в честь Ньютона назвали ньютон (1 Н).

Следует помнить, что термин "сила" всегда связан с взаимодействием тел и является его количественной мерой.

Допустим, что вы прочитали такое предложение: "На тело $m$ действует сила $F$". Это означает, что на тело действует какое-то другое тело, т.е. тело $m$ взаимодействует с некоторым телом и мера этого взаимодействия равна $F$.

**2. Измерение сил.** Так как в результате взаимодействия появляются ускорение и деформация тел, то о силе можно судить и по ускорению, и по деформации. Это делает необходимым более подробное и тщательное изучение деформации тел и ускорений, получаемых при их взаимодействии. Начнем с изучения деформаций.

*Проведем опыт.* К *штативу подвесим пружину*, оканчивающуюся петлей, на которую можно подвешивать грузы (рис. 41, *а*). Около края петли установим индикатор, отмечающий длину пружины. Обозначим длину пружины в свободном состоянии $l_0$.

Подвесив один из грузов к пружине, обнаружим, что длина пружины несколько увеличилась.

Увеличивая число подвешенных к пружине грузов в 2, 3, 4, 5 раз, заметим, что во столько же раз увеличивается и удлинение пружины $\Delta l$, которое называют

● *абсолютным удлинением.*

Иными словами, абсолютное удлинение прямо пропорционально действующей на пружину силе. Это можно записать так: $\Delta l \sim F$. Знак $\sim$ означает пропорционально.

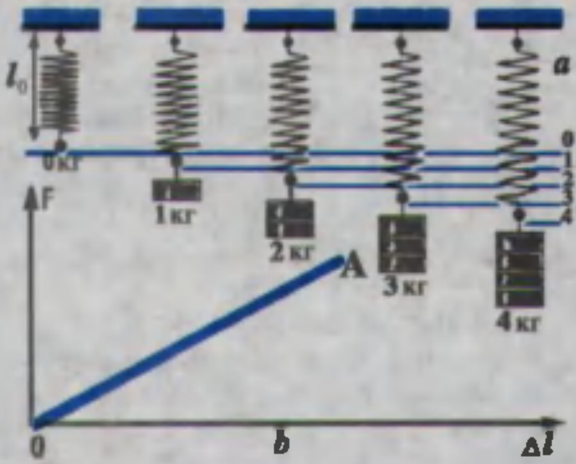


*Рис. 41*

Если по данным опыта построить график зависимости удлинения пружины от деформирующей силы, то найденная зависимость изобразится прямой линией *OA* (рис. 41, *b*). Снимая постепенно грузы, обнаружим, что пропорционально уменьшается и удлинение. После того как нагрузку снимем полностью, пружина будет иметь ту же длину *l*.

*Деформацию, исчезающую после снятия нагрузки, называют упругой.*

Обобщая аналогичные опыты, английский физик Р. Гук пришел к выводу, *что всегда абсолютное удлинение при упругих деформациях прямо пропорционально приложенной силе* (закон Гука):

$$\boxed{\Delta l = \frac{1}{k} F,}$$

где $k$ — коэффициент, характеризующий пружину, называется *жесткостью.*

Явление упругой деформации использовано в устройстве приборов для измерения силы — силомеров, или, как принято говорить в физике, динамометров. Конструкции динамометров весьма разнообразны, но принцип работы их одинаков: в них использовано свойство тел удлиняться, изгибаться или сжиматься при

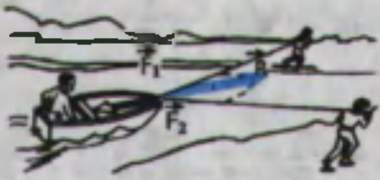


Рис. 42

упругой деформации прямо пропорционально приложенной силе.

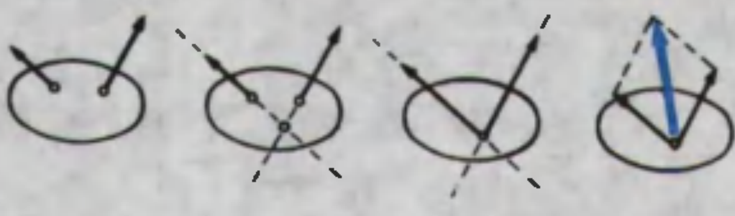
**3. Сложение сил.** Сила — величина векторная, поэтому в том случае, когда на материальную точку действуют несколько сил, они складываются геометрически.

Силу, заменяющую действие на материальную точку нескольких сил, называют *равнодействующей* этих сил (на рис. 42 это сила $R$ ). Равнодействующая равна геометрической сумме сил, действующих на материальную точку.

Но как найти равнодействующую в случае, когда две (или несколько) силы действуют на разные точки твердого тела (рис. 43, *a*)? В этом случае правило параллелограмма применять непосредственно нельзя.

Если твердое тело деформируется под действием приложенных к нему сил весьма незначительно, то деформацией тела можно пренебречь и считать тело недеформируемым[1]. В этом случае точки приложения сил можно перенести в любую другую точку тела по линии действия силы.

Поэтому, чтобы найти равнодействующую несколь-



*a* *b* *d* *e*

Рис. 43

[1] Такие воображаемые тела в физике называют абсолютно твердыми. Это абстракция, позволяющая не рассматривать деформацию тела.

ких сил, действующих на разные точки твердого тела, надо:

а) провести линии действия этих сил (рис. 43, *b* );

б) перенести точки приложения сил в точку пересечения их линий действия (рис. 43, *d* );

в) найти равнодействующую по правилу сложения векторов (рис. 43, *e* ). Может оказаться, что линии действия сил пересекаются не в одной, а в разных точках. В этом случае надо сложить те силы, линии действия которых пересекаются, а затем сложить полученные равнодействующие.

Равнодействующую имеет не каждая система сил. Например, не имеют равнодействующей: а) две равные параллельные силы, направленные в разные стороны; б) силы, не лежащие в одной плоскости.

Две силы, действующие на твердое тело, взаимно уравновешиваются тогда и только тогда, когда они равны по модулю и действуют по одной прямой в противоположные стороны.

?

1. Приведите примеры взаимодействия тел.
2. Что в физике понимают под словом "сила"?
3. Какими приборами и в каких единицах измеряют силу?
4. Какую силу называют равнодействующей?
5. На материальную точку под углом 60° друг к другу действуют три силы по 100 Н каждая. Чему равна их равнодействующая и сила их уравновешивающая?

## §19. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. МАССА

**1. Инертность тел.** Тележку с капельницей поставим на гладкий горизонтальный стол (рис. 44). Прикрепим к тележке нить, ко второму концу которой, перекинутому через блок, подвесим груз *m*. Отпустив тележку, заметим, что она приходит в движение и ее

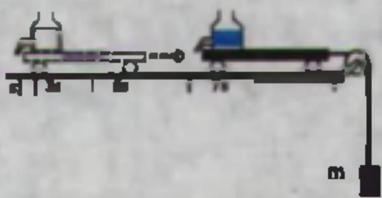


*Рис. 44*

скорость постепенно увеличивается. Изучение расположения капель на бумаге ($s_1:s_2:s_3... = =1:3:5:7...$) свидетельствует, что тележка двигалась равноускоренно.

Постепенно нарастает и скорость движения трогающихся с места автомобилей и железнодорожных поездов.

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

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

Описанный выше опыт и наблюдения, а также повседневная практика свидетельствуют о том, что у всех тел есть общее свойство: скорость движения тел в процессе их взаимодействия изменяется постепенно и для ее изменения требуется некоторое время. Это свойство ● тел получило название *инертности*.

**2. Масса.** Все тела инертны. Но инертность различных тел разная. Из двух взаимодействующих тел инертность больше у того тела, которое в результате взаимодействия приобретает меньшее ускорение. Так, например, при выстреле ружье приобретает меньшее ускорение, чем пуля. Следовательно, инертность ружья больше инертности пули. При взаимном отталкивании взрослого конькобежца и мальчика (рис. 45), взрослый конькобежец получает меньшее ускорение, чем мальчик. Это свидетельствует о том, что инертность взрослого человека больше, чем мальчика.


*Рис. 45*

● *Для характеристики инертности тел ввели особую величину — массу*, которую принято обозначать буквой *m*.

Чтобы иметь возможность сравнивать массы различных тел, массу какого-то из них надо принять за единицу. Выбор единицы массы в принципе произволен, однако единица массы должна быть удобна для ее практического применения.

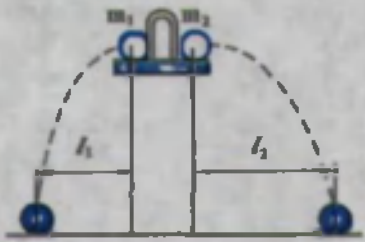


Рис. 46

В Международной системе единиц за единицу массы принята масса специального эталона, изготовленного из твердого, не окисляющегося на воздухе сплава ● платины и иридия. Эта единица массы получила название **килограмм** — 1 кг.

Имея эталон единицы массы, можно сравнивать с ним массы других тел. Существует несколько способов сравнения масс.

Рассмотрим один из них. Положим на горизонтальную пластину, поднятую над полом, шарик для игры в настольный теннис и такой же шарик, но наполненный песком. Между шариками поставим сжатую *пружину, которая удерживается в сжатом состоянии* нитью (рис. 46). Пусть масса одного из шариков нам известна, обозначим ее буквой $m_1$. Масса второго шарика - $m_2$. Перережем нить. Распрямляясь, пружина толкает шарики в горизонтальном направлении и они одновременно падают на пол. Расстояния, пройденные шариками в горизонтальном направлении, различны: шарик, наполненный песком, пролетел меньшее расстояние, чем полый. Опыт свидетельствует, что в результате взаимодействия с пружиной полый шарик двигался с большим ускорением и приобрел большую скорость, чем шарик, наполненный песком. Следовательно, его инертность меньше.

Опыты, аналогичные проделанному, свидетельствуют о том, что при отсутствии сил трения в результате взаимодействия всегда расстояния, пройденные телами, обратно пропорциональны массам взаимодействующих тел:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Если масса одного тела (например, $m_1$) известна, то массу второго тела легко найти:

$$m_2 = m_1 \frac{l_1}{l_2}.$$

Таким образом, зная массу одного из тел, можно определить массу другого.

Мы рассмотрели только один из способов сравнения масс. Существуют и другие.

**Важное примечание.** Понятие массы — очень сложное понятие. Пока об этом понятии вы узнали очень немногое, лишь то, что необходимо для изучения дальнейшего материала. По мере изучения механики содержание этого понятия будет постепенно расширяться, уточняться и углубляться. Пока же надо хорошо понять то, что сказано было о массе в этом параграфе.

?

1. В чем проявляется инертность тел?
2. Что такое масса тела? Как можно ее определить?
3. Что принято за единицу массы в Международной системе единиц?

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ IV

1. Движение и взаимодействие — два неотъемлемых свойства материи.

2. В результате механического взаимодействия происходят изменения скорости движения и деформация взаимодействующих тел; эти проявления взаимосвязаны как две стороны взаимодействия.

3. Силой называют векторную физическую величину, характеризующую механическое действие одного тела на другое и являющуюся мерой этого действия. Силы можно измерять по деформации. Для этого существуют специальные приборы — динамометры.

4. Все тела инертны. Инертностью называют свойство тел, проявляющиеся в том, что скорость их движения остается неизменной до тех пор, пока на них не подействуют другие тела. В процессе же взаимодействующих тел инертность больше у того тела, которое в процессе взаимодействия приобретает меньшую скорость, или, что одно и тоже, получает меньшее ускорение.

5. Для характеристики инертности тел введено понятие массы. Масса — величина скалярная.

6. За единицу массы в Международной системе единиц принята масса платино-иридисвого эталона. Эту единицу массы называют килограммом.

7. Равнодействующей силой называют силу, которая заменяет действие системы сил, действующих на данную точку твердого тела. Равнодействующая система сил, действующая на одну точку тела, равна их геометрической сумме.

## Глава V. ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

Законы движения макроскопических тел впервые были сформулированы в 1686 г. Исааком Ньютоном и носят его имя. Мы сознательно применили слово "сформулированы", а не "открыты". Дело в том, что изучением движения занимались многие ученые, жившие до Ньютона. Особенно многое сделал итальянский ученый Галилео Галилей. Ньютон тщательно изучил и творчески обобщил работы своих предшественников. Это позволило ему не только развить учение о движении, но и создать законченную теорию механического движения, которая впоследствии только уточнялась.

Ньютон писал в одном из своих писем английскому физику Р. Гуку: "Если я видел дальше, чем другие, то лишь потому, что стоял на плечах гигантов".

Приступая к изучению законов движения, следует иметь в виду, что они являются обобщением опытных факторов. Справедливость этих законов с высокой точностью подтверждается всей системой опытных факторов, которыми владеет человечество.

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

## § 20. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА – ЗАКОН ИНЕРЦИИ

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

**1. Опыты, помогающие понять первый закон Ньютона.** Допустим, что на горизонтальном столе лежит шар. Повседневные наблюдения убеждают в том, что он будет лежать до тех пор, пока на него не подействует какое-либо другое тело и не выведет из этого состояния.

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

Поставим на горизонтальный стол наклонный желоб. Стол около желоба покроем грубой наждачной бумагой. Отпустим в верхней части желоба стальной шарик. Шарик, скатившись по желобу, вследствие своей инертности покатится по горизонтальному столу, но вскоре остановится (рис. 47, *a*). Причина остановки, по-видимому, - трение шарика о наждачную бумагу. Чтобы проверить сделанное предположение о причине остановки шарика, уберем бумагу и повторим опыт. Шарик прокатится дальше (рис. 47, *b*).

Если на стол впритык к желобу положить лист стекла, шарик прокатится еще дальше (рис. 47, *d*). Нако-

---

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

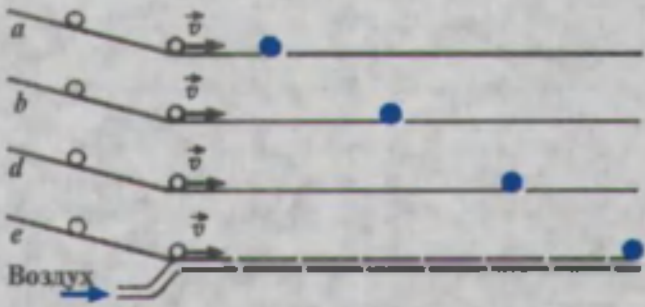



*Рис. 47*

нец, приставим к наклонному желобу полый горизонтальный желоб, в котором по всей его длине сделано много маленьких отверстий, через которые с помощью пылесоса продувается воздух. (В этом случае шарик будет находиться на "воздушной подушке", значительно уменьшающей трение). Повторив опыт, мы заметим, что шарик прокатывается вдоль всего желоба (рис. 47, *е*).

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

Представим себе, что трение исчезло. Очевидно, в этом случае шарик будет двигаться прямолинейно и равномерно до тех пор, пока на него не подействуют другие тела и не изменят модуль или направление скорости его движения.

В этом проявляется инертность шарика. Поэтому движение такого "свободного" тела (т.е. тела, на которое не действуют никакие другие тела) называют *движением по инерции.*

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

До Галилея господствовало учение греческого ученого Аристотеля, который утверждал, что тело движется только тогда, когда на него действуют другие тела (силы).

Ньютон, подобно другим ученым XVII в., был убежден в правоте Галилея и включил закон инерции в систему законов движения, сформулировав его следующим образом:

*Всякое тело сохраняет свое первоначальное состояние относительного покоя или прямолинейного и равномерного движения, пока на него не подействуют другие тела и не выведут из этого состояния.*

Этот закон называют *законом инерции* или *первым законом Ньютона*.

**?**

**1.** Сформулируйте первый закон Ньютона.

**2.** Приведите примеры, подтверждающие первый закон Ньютона.

**3.** Нельзя ли первый закон Ньютона вывести путем логических рассуждений? Экспериментально?

## §21. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Как уже было сказано, законы Ньютона образуют систему законов, совокупность которых объясняет закономерности механического движения тел. Закон инерции — первый из них; он объясняет, что тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет свое первоначальное состояние относительного покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока на него не подействуют другие тела и не выведут из этого состояния. На вопрос о том, что произойдет с телом в результате его взаимодействия с другими телами, ответ дает второй закон Ньютона.

**1. Опыты, помогающие понять второй закон Ньютона.** Сущность этого закона была раскрыта в результате анализа и обобщения огромного фактического материала, накопленного человеком в ходе его многовековой практики. Справедливость закона с большой точностью подтверждена всей совокупностью факторов, полученных в ходе практической деятельности человека.

Второй закон Ньютона можно понять, рассмотрев и проанализировав описанные ниже опыты.

**Опыт 1.** На легкоподвижной тележке закрепим два двигателя, на осях которых установлены воздушные винты (рис. 48, *a*). На тележку поставим чувствительный акселерометр.

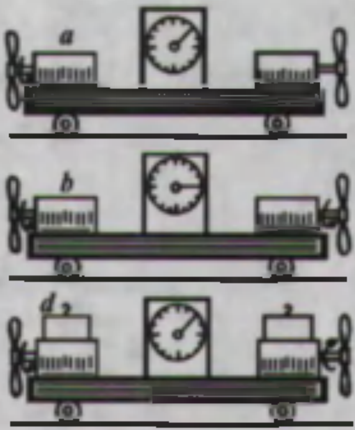


*Рис. 48*

Включив один из двигателей, мы заметим, что тележка движется с ускорением $a$. Возвратив тележку в начальное положение, включаем одновременно оба двигателя. В этом случае тележка движется с ускорением $2a$ (рис. 48, *b*). Что изменилось в опыте? Чтобы ответить на этот вопрос, измерим с помощью динамометра силу тяги одного винта и двух винтов одновременно. Оказывается, сила тяги во втором случае в 2 раза больше.

Опыт дает нам основание утверждать, что ускорение, с которым движется тележка постоянной массы, пропорционально действующей на нее силе:

$$a \sim F \text{ (при } m = \text{const).}$$

Увеличим массу тележки в 2 раза. Для этого положим на нее стальные пластинки, масса которых равна массе тележки со всеми установленными на ней приборами (рис. 48, *d*). Повторив опыт, обнаружим, что при этом ускорение, сообщаемое тележке воздушными винтами, уменьшилось в 2 раза. Если бы мы проделали опыт с тележкой, масса которой была бы в 3 раза больше начальной массы, то ускорение было бы в 3 раза меньше. На основании этих опытов можно утверждать, что ускорение, сообщаемое тележке одной и той же постоянной силой, обратно пропорционально массе:

$$a \sim \frac{1}{m} \text{ (при } F = \text{const).}$$

Объединив результаты опытов, можно утверждать, что ускорение тележки прямо пропорционально действующей на нее силе и обратно пропорционально массе:

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

**2. Формулировка второго закона Ньютона.** Проделанные опыты помогли нам понять взаимосвязь ускорения, силы и массы. Однако эта взаимосвязь справедлива не только для тележки. Можно вместо нее взять любое другое тело — всегда зависимость между ускорением, силой и массой будет той же самой:

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

Для того, чтобы от знака пропорциональности перейти к знаку равенства, необходимо поставить коэффициент пропорциональности $k$:

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

В Международной системе единиц единица силы выбрана такой, что коэффициент пропорциональности $k = 1$. Поэтому:

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

Если направление ускорения совпадает с направлением действующей на тело силы, то формулу можно записать в векторной форме:

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

Это соотношение и выражает второй закон Ньютона, который можно сформулировать так:

*Ускорение, приобретаемое телом в результате взаимодействия с другим телом, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально его массе.*

?

1. Опишите по рис. 48 опыт, приведенный в п. 1.
2. Сформулируйте второй закон Ньютона.

## § 22. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ. НЕЗАВИСИМОСТЬ ДЕЙСТВИЯ СИЛ

Понятие силы является одним из основных понятий механики Ньютона. При первоначальном знакомстве с этим понятием в VI классе вы узнали о нем не все. Знание второго закона Ньютона позволяет расширить и углубить представления о силе.

**1. Измерение силы.** При взаимодействии тел имеют место два явления: тела деформируются и получают ускорения.

В тех случаях, когда надо измерить силу, о ней судят по деформации, а в тех случаях, когда необходимо рассчитать силы взаимодействия, о силе судят по ускорению, которое получает тело в результате этого взаимодействия.

Из второго закона Ньютона следует, что:

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

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

Используя эту формулу, можно установить единицу силы. Для этого допустим, что мы имеем тело массой 1 кг, которое движется с ускорением 1 м/с$^2$. Тогда сила, действующая на тело, равна единице. Она определяется следующим образом:

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

За единицу силы в Международной системе единиц принята такая сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с². Эту единицу силы называют **ньютоном** (1 Н).

Объединяя все сказанное в §18 и §21 о силе, можно дать следующее определение:

*Силой называют векторную физическую величину, характеризующую механическое действие одного тела на другое и являющуюся мерой этого действия.*

**2. Независимость действия сил.**

Пусть на тело (материальную точку) массой $m$ одновременно действуют $N$ сил: $\vec{F}_1$; $\vec{F}_2$; $\vec{F}_3$; ...; $\vec{F}_N$.

Если бы каждая из них действовала на тело отдельно (в отсутствие других), то сообщаемые ими ускорения были бы:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_1}{m}; \quad \vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_2}{m}; \quad \vec{a}_3 = \frac{\vec{F}_3}{m}; \ \ldots \quad \vec{a}_N = \frac{\vec{F}_N}{m}.$$

А чему будет равно ускорение, если все силы действуют одновременно? Опыт свидетельствует, *что ускорение, сообщаемое телу при одновременном действии нескольких сил, равно векторной сумме ускорений, которые сообщила бы этому телу каждая сила, действуя в отдельности:*

$$\boxed{\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3 + \ldots + \vec{a}_N}$$

Это положение называют *принципом независимости действия сил.*

Преобразуем полученную формулу. Для этого заменим в ней ускорения их значениями, выраженными через силы и массы:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1}{m} + \frac{\vec{F}_2}{m} + \frac{\vec{F}_3}{m} + \ldots + \frac{\vec{F}_N}{m} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_N}{m}.$$

В числителе стоит равнодействующая сила. Поэтому:

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

Таким образом, ускорение, сообщаемое телу (материальной точке) в результате одновременного действия нескольких сил, равно ускорению, которое сообщает их равнодействующая.

**3. Пример решения задачи.**

Рассчитайте силу, с которой Земля действует на тело массой 1 кг.

**Анализ условия**. Мы знаем, что все тела свободно падают на землю с ускорением $g = 9{,}8$ м/с$^2$. Зная ускорение и массу тела, по второму закону Ньютона легко рассчитать силу притяжения тела к Земле, которую называют *силой тяжести* и обозначают буквой $Q$:

$$\vec{Q} = m\vec{g} \quad \text{и} \quad Q = mg.$$

Эти две формулы, полученные в ходе решения задачи, имеют большое значение и их следует запомнить.

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $m = 1$ кг<br>$g = 9{,}8$ м/с$^2$ | $Q = 1 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2 = 9{,}8 \dfrac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = 9{,}8$ Н. |
| $Q = ?$ | **Ответ:** $Q = 9{,}8$ Н. |

?

1. Какую физическую величину называют силой?
2. Дайте определение единице силы в Международной системе единиц.
3. Зависит ли действие силы на тело от действия других сил?
4. С каким ускорением движутся тела, изображенные на рис. 49? (Ответ: $a = 3{,}26$ м/с$^2$).

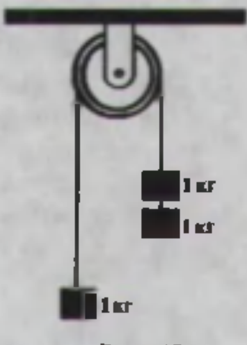


*Рис. 49*

## § 23. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Еще раз повторим, что законы Ньютона взаимосвязаны. Их содержание, глубокий физический смысл можно хорошо понять только в том случае, когда хорошо усвоена взаимная связь этих законов.

Первый закон говорит о том, что тело сохраняет

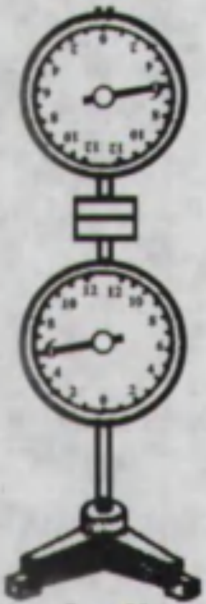


Рис. 50

свое первоначальное состояние относительного покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока на него не подействует другое тело и не выведет его из этого состояния.

*Второй закон* развивает сказанное в первом законе и утверждает, что в результате взаимодействия тело приобретает ускорение, прямо пропорциональное силе и обратно пропорциональное массе тела.

Но ни первый, ни второй закон не говорят о том, что происходит со вторым взаимодействующим телом. Об этом идет речь в третьем законе Ньютона.

**1. Опыт, раскрывающий содержание третьего закона Ньютона.** Возьмем два одинаковых динамометра и поставим их друг на друга (рис. 50). Верхний динамометр давит на нижний с какой-то силой $\vec{F}_1$, направленной вниз, нижний фиксирует эту силу. Но одновременно и верхний динамометр отмечает равную по модулю силу $\vec{F}_2$, но направленную в противоположную сторону.

Опыт свидетельствует о том, что в этом случае тела (динамометры) *взаимодействуют с равными по модулю, но противоположно направленными силами*:

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

Сколько бы опытов мы ни проводили, всегда будет обнаруживаться следующая характерная закономерность взаимодействия тел: *силы, с которыми действуют взаимодействующие тела друг на друга, всегда равны по модулю и противоположны по направлению.*

**2. Формулировка третьего закона Ньютона.** Ньютон сформулировал третий закон следующим образом:

*Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, или действия двух тел друг на дру-*

*га между собой равны и направлены в противоположные стороны.*

В этой формулировке использованы недостаточно определенные термины "действие" и "противодействие". Ньютон под этими терминами понимал силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга. Поэтому третий закон можно сформулировать и так:

*Силы, с которыми взаимодействующие тела действуют друг на друга, направлены по одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:*

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

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

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

**3*. Пример решения задачи.** Человек, сидя в лодке на озере, подтягивает к себе с помощью веревки вторую лодку (рис. 51). Какие расстояния пройдут лодки за 10 с, если масса первой из

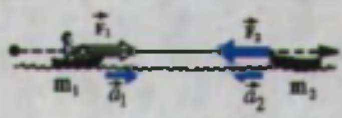


*Рис. 51*

них (вместе с человеком) $m_1 = 250$ кг, а второй – $m_2 = 200$кг? Человек тянет веревку с силой $F = 100$ Н. (Сопротивление воды движению лодок не учитывать).

**Анализ условия.** Будем считать, что лодки в начальный момент в системе отсчета, связанной с водой, были неподвижны. Направим ось $OX$ в направлении движения первой лодки.

Расстояния, пройденные лодками, можно вычислить по формулам:

$$s_1 = \frac{a_1 t^2}{2};\ s_2 = \frac{a_2 t^2}{2}.$$

Модули ускорений лодок можно определить, используя второй закон Ньютона:

$$a_1 = \frac{F_1}{m_1} \quad \text{и} \quad a_2 = \frac{F_2}{m_2}.$$

Согласно третьему закону Ньютона силы, действующие на лодки, равны и противоположны:

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

**Решение**. Подставив значения ускорений и сил в формулы расстояний, получим:

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

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $F = 100$ кг · м/с$^2$<br>$t = 10$ с<br>$m_1 = 250$ кг<br>$m_2 = 200$ кг | $s_1 = \dfrac{100\ \text{кг}\cdot\text{м/с}^2 \cdot 100\ \text{с}^2}{2 \cdot 250\ \text{кг}} = 20$ м; |
| | $s_2 = \dfrac{100\ \text{кг}\cdot\text{м/с}^2 \cdot 100\ \text{с}^2}{2 \cdot 200\ \text{кг}} = 25$ м. |
| $s_1 = ?$<br>$s_2 = ?$ | **Ответ**: $s_1 = 20$ м; $s_2 = 25$ м. |

**?**

1. Сформулируйте третий закон Ньютона.
2. Приведите примеры, подтверждающие третий закон Ньютона.

3. Могут ли уравновесить друг друга силы взаимодействия двух тел — ведь они равны и противоположно направлены?
4. На тело массой 20 кг, лежащее на горизонтальной дороге, действует постоянная сила F = 1 Н. Какое растояние пройдет тело под действием этой силы за 30 с?

## § 24. РЕАКЦИЯ СВЯЗИ. СИЛЫ УПРУГОСТИ

**1. Реакция связи.** До сих пор мы рассматривали поведение тел, которые под действием приложенных сил могли двигаться в любом направлении. Такие тела называют *свободными*. В реальных устройствах перемещению тела часто препятствуют другие скрепленные или соприкасающиеся с ним тела, которые называют *связью*.

Например, тело, подвешенное на нити к потолку (рис. 52), не падает, так как этому препятствует связь — нить. Мостовая ферма (рис. 53) не падает, так как этому препятствуют связи — опоры моста. Стрела подъемного крана не падает потому, что ее удерживают связи — канаты и опора.

Тело, которое под действием приложенных к нему сил должно было бы переместиться, действует на связь с некоторой силой $\vec{F}$. По третьему закону Ньютона связь будет действовать на тело с такой же по модулю, но противоположно направленной силой $\vec{N}$, которую называют *реакцией связи*:

$$\vec{N} = -\vec{F}$$

*Рис. 52*

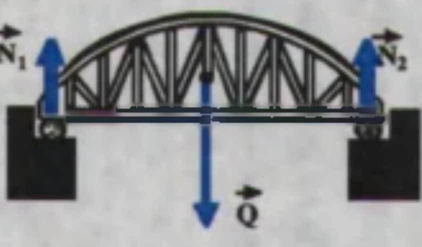


*Рис. 53*

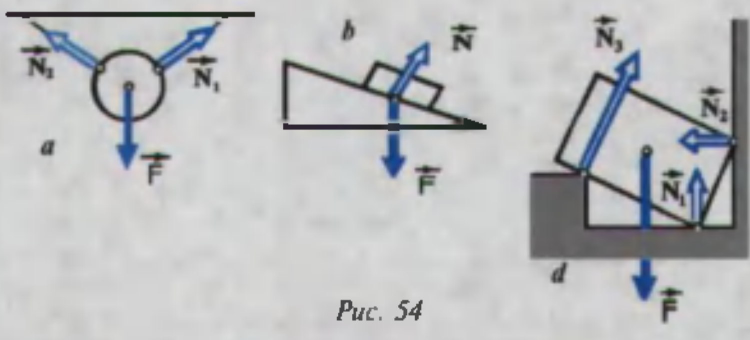



*Рис. 54*

Направление реакций связи определяется действующими на связь силами. В том случае, когда нет сил трения (идеальная связь), реакция связи направлена по общей нормали к поверхности соприкасающихся тел в точке их касания. На рис. 54 (*a*, *b*, *d*) показаны примеры реакций связи. Рассмотрите эти рисунки внимательно.

**2. Силы упругости.** Внешняя сила, действующая на связь, или растягивает ее (рис. 55, *a*), или сжимает (рис. 55, *b*), или закручивает (рис. 55, *d*). При этом молекулы тела, осуществляющего связь, смещаются относительно своих обычных положений. Чем больше внешняя (деформирующая) сила, тем больше это смещение. Но мы знаем, что между молекулами действуют силы притяжения и отталкивания, которые по третьему закону Ньютона противодействуют внешней деформирующей силе (конечно, до тех пор, пока деформация связи упругая); они-то и обуславливают возникновение реакции связи. Следовательно, реакция связи всегда имеет молекулярную природу.

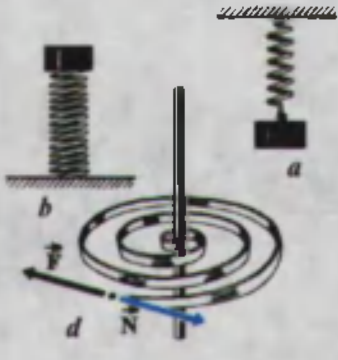



*Рис. 55*

По закону Гука абсолютная (упругая) деформация пропорциональна приложенной к телу силе (см. §18). Следовательно, и силы упругости пропорциональны абсолютной деформации: чем больше деформация тела (связи), тем больше силы упругости. Математически это можно записать так: $F_{упр} \sim \Delta l$. При переходе к знаку равенства необходимо поставить коэффициент пропорциональности:

$$\boxed{F_{упр.} = -k\Delta l.}$$

Знак "–" поставлен потому, что сила упругости всегда противоположна по направлению абсолютной деформации.

● Коэффициент $k$ называют *жесткостью.*

*Таким образом, силой упругости называют силу, возникающую в теле при его деформации. Сила упругости пропорциональна абсолютной деформации и направлена противоположно деформирующей тело силе.*

?

**1.** Какие тела в механике называют свободными?

**2.** Что в механике называют связью?

**3.** Что такое реакция связи?

**4.** Перерисуйте в тетрадь рис. 55 и покажите направление реакций связи.

## § 25. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

### *Лабораторная работа №2*

***Цель работы:*** определить жесткость пружины учебного динамометра.

***Необходимые приборы и материалы:*** штатив с лапкой, спиральная пружина, набор грузов, полоска миллиметровой бумаги или линейка с миллиметровыми делениями.

***Порядок выполнения работы.***

1. Укрепите динамометр так, как показано на рис. 56.

2. На шкале динамометра укрепите миллиметровую бумагу или, что одно и то же, линейку с миллиметровыми делениями.

3. Отметьте начальное положение стрелки динамометра.

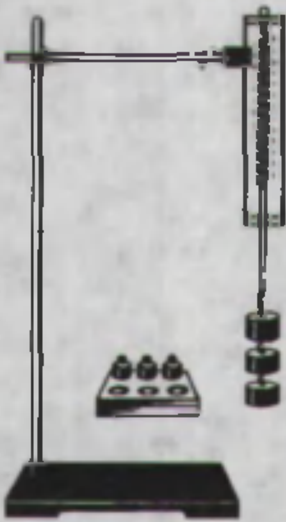


Рис. 56

4. Подвесьте к пружине динамометра груз $m$ и измерьте вызванное им удлинение пружины $\Delta l$.

5. Найдите удлинение пружины под действием грузов $2m$, $3m$ и $4m$.

6. По данным измерений вычислите жесткость пружины по формуле:

$$k = \frac{mg}{\Delta l}.$$

7. Найдите среднее арифметическое найденных значений жесткости пружины.

8. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № опыта | $F$ | $\Delta l$ | $k$ |
|---|---|---|---|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |
| Средние значения | | | |

9. Оцените точность результата.

### *Упражнение 5*

1. Может ли скорость тела измениться мгновенно от 0 до 1 м/с? Ответ обоснуйте.

2. С какой силой нужно действовать на тело массой 5 кг, чтобы оно падало вертикально с ускорением 15 м/с$^2$?

(Ответ: $F = 26$ Н).

3. Трамвай массой $6 \cdot 10^3$ кг двигался со скоростью 36 км/ч. При торможении он остановился за 30 с. Определите силу торможения.

(Ответ: $F = 2000$ Н).

**4.** С каким ускорением движется система тел, изображенная на рис. 57? (Трение, массу и растяжение нити не учитывать).

(Ответ: $a \approx 1$ м/с²).

**5.** Найдите натяжение нити между тележкой и правым грузом в предыдущей задаче (см. рис. 57).

(Ответ: $F \approx 6{,}8$ Н).

**6.** Тело начинает скользить с наклонной плоскости длиной 10 м и высотой 5 м. Определите время, за которое оно достигнет основания этой наклонной плоскости.

(Ответ: $t = 2$ с).

**7*.** К концам легкой нерастяжимой нити, перекинутой через блок, прикреплены тела массой $m_1 = 7$ кг и $m_2 = 1$ кг. Груз $m_1$ находится на высоте $H = 2{,}45$ м над поверхностью стола, а груз $m_2$ — на поверхности. Какую скорость будет иметь груз $m_2$ в момент соприкосновения груза $m_1$ с поверхностью стола? (Трение не учитывать.)

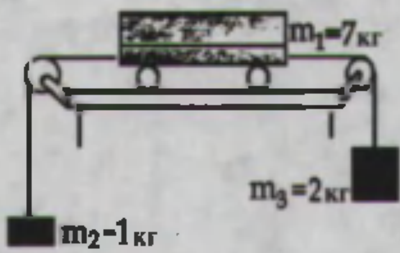



*Рис. 57*

(Ответ: $v = 4{,}9$ м/с²).

**8.** Два человека тянут веревку в разные стороны с силой 80 Н. Разорвется ли веревка, если она выдерживает натяжение 100 Н?

**9.** Найдите силы давления пороховых газов на пулю в охотничьем ружье, если известно, что длина ствола 1,2 м, а пуля вылетает из него со скоростью 400 м/с. Масса пули 10 г.

(Ответ: $F \approx 667$ Н).

**10*.** На гладкой горизонтальной поверхности расположены три тела массами 1, 2 и 3 кг, связанные нитями друг с другом. К телу массой 1 кг прикреплена перекинутая через блок нить, на конце которой закреплен груз массой 1 кг. Найдите ускорение системы и натяжение всех нитей. Нити считайте нерастяжимыми и невесомыми. (Трение не учитывать).

(Ответ: $a = 1{,}4$м/с²; $F_{н1} = 8{,}4$Н; $F_{н2} = 7$Н; $F_{н3} = 4{,}2$Н).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ V

1. Вся совокупность известных фактов свидетельствует о том, что причиной изменения движения тел, т.е. причиной возникновения ускорений, является взаимодействие тел.

2. Силой называют векторную величину, являющуюся мерой механического действия одного тела на другое при их взаимодействии. Сила измеряется произведением массы тела на сообщенное телу этой силой ускорение $\vec{F} = m\vec{a}$.

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

4. Первый закон Ньютона утверждает, что существуют такие системы отсчета (инерциальные системы), относительно которых тела либо находятся в относительном покое, либо движутся прямолинейно и равномерно, пока на них не подействуют окружающие тела и не выведут из этого состояния.

5. Второй закон Ньютона дает количественную оценку действию одного тела на другое: ускорение, сообщаемое телу другим телом (или телами), прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела:

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

6. Третий закон Ньютона говорит о том, что силы, с которыми тела действуют друг на друга, всегда равны по модулю и противоположны по направлению:

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

7. Законы механики, сформулированные Ньютоном, неизменны во всех инерциальных системах отсчета. В механике Ньютона неизменны также время, масса тела, ускорение и сила. Траектория, скорость, перемещение различны в разных инерциальных системах отсчета.

# Глава VI. ДВИЖЕНИЕ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕНИЯ

## § 26. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ

При движении тел между ними возникают силы трения. Силу взаимодействия соприкасающихся поверхностей двух тел называют *силой внешнего трения*. Внешнее трение существует не только при движении тел, но и тогда, когда тела находятся в относительном покое. Например, брусок, лежащий на наклонной плоскости (рис. 58), не соскальзывает потому, что сила трения $\vec{F}_{тр}$ уравновешивает равнодействующую $\vec{R}$ силу тяжести $\vec{Q}$ и силу реакции опоры $\vec{N}$.

**1. Трение покоя.** Чтобы изучить трение покоя, на горизонтальную поверхность положим тяжелый брусок, к которому прикрепим нить, перекинутую через блок (рис. 59). Подвесим к нити груз массой $m$. Брусок не движется. Следовательно, все действующие на него силы взаимно уравновешены. Рассмотрим эти силы.

На брусок действуют сила тяжести $\vec{Q}$ и уравновешивающая ее сила реакции $\vec{N}$, а также сила $\vec{F}$ со сто-

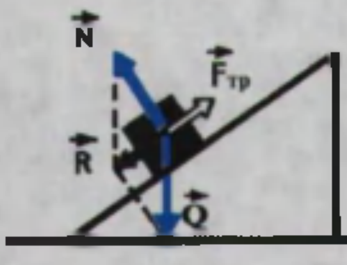



*Рис. 58*

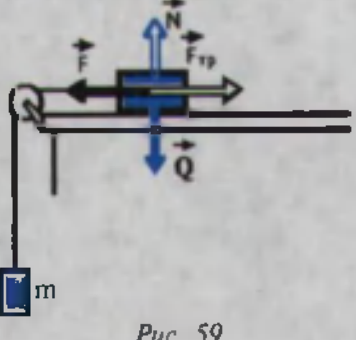



*Рис. 59*

роны нити. Что же уравновешивает силу $\vec{F}$? Единственной силой, уравновешивающей ее, может быть только сила, возникающая между соприкасающимися поверхностями тел, - сила трения $\vec{F}_{тр}$ направлена вдоль соприкасающихся поверхностей, но противоположно силе $\vec{F}$. $\vec{F}_{тр} = -\vec{F}$.

Прикрепим к нити еще один груз, такой же, как первый. Брусок по-прежнему не движется. Следовательно, сила $2F$ также уравновешивается силой трения. Постепенно добавляя грузы, мы, наконец, заметим, что брусок начнет двигаться.

Проделанный нами опыт свидетельствует о том, что:

1) сила трения существует не только тогда, когда брусок движется по поверхности стола, но и тогда, когда он неподвижен относительно стола. Трение, возникающее между неподвижными друг относительно друга поверхностями, называют *трением покоя*;

2) сила трения покоя всегда равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к телу параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом.

Выясним, от чего и как зависит максимальная сила трения покоя. Поставив на брусок тяжелую гирю, повторим описанный выше опыт. Он будет проходить аналогично, но максимальное значение силы трения покоя в этом случае больше. Так как в опыте изменилась только сила давления на соприкасающиеся поверхности, то можно сделать вывод, что максимальная сила трения покоя пропорциональна силе давления. Сколько бы раз мы ни повторяли опыт, каждый раз результат будет один и тот же: максимальная сила трения покоя для двух взятых поверхностей пропорциональна силе давления. Но по третьему закону Ньютона сила давления равна силе реакции опоры. Следовательно, сила трения покоя пропорциональна силе давления, или, что одно и тоже, силе реакции опоры:

$$F_{тр} \sim N.$$

Если взять брусок, изготовленный из другого материала, и вновь проделать опыты, аналогичные описанным, то и в этом случае максимальная сила трения покоя зависит от силы давления. Но ее значение иное. Следовательно, максимальная сила трения покоя зависит от материала соприкасающихся поверхностей. Запишем это так:

$$F_{тр} \sim \mu_0.$$

● Величину $\mu_0$ называют *коэффициентом трения покоя*. Таким образом, сила трения покоя зависит от силы давления $N$ и материалов соприкасающихся поверхностей:

$$\boxed{F_{тр} = \mu_0 N^{1}.}$$

Проделанные нами опыты свидетельствуют о том, что сила трения покоя препятствует началу движения, удерживает соприкасающиеся тела в относительном покое. Однако бывают случаи, когда сила трения покоя служит причиной ускорения движения тела. Так, при ходьбе именно сила трения покоя $\vec{F}_{тр}$, действующая на подошву обуви, сообщает нам ускорение (рис. 60, *a*). Подошва не скользит назад, и, значит, трение между ней и опорой (дорогой) — это трение покоя. Сила же $\vec{F}$, равная по модулю силе трения покоя $\vec{F}_{тр}$, но противоположно направленная, сообщает ускорение опоре.

Чтобы яснее представить сказанное, допустим, что человек бежит не по обычной дороге, а по специальной дорожке, установленной на подвижных роликах (рис. 60, *b*). В этом случае бе-

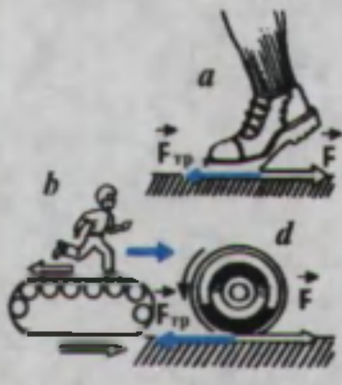


*Рис. 60*

[1]Формула записана не в векторной форме, так как сила трения перпендикулярна силе давления и силе реакции опоры.

гущий человек, отталкивая дорожку, заставляет ее двигаться в обратную сторону. Такие дорожки применяются для тренировки спортсменов и космонавтов.

Таким же образом колеса автомобилей и других движущихся устройств отталкиваются от дороги с силой, равной силе трения покоя (равной по модулю и противоположно направленной) (рис. 60, *d*).

?

1. Какое трение называют внешним?
2. Напишите формулу для силы трения покоя и объясните ее.

## § 27. ВИДЫ СИЛ ТРЕНИЯ

**1. Сила трения скольжения.** Будем тянуть брусок вручную, а силу трения измерять динамометром (рис. 61, *a*). Постепенно увеличивая усилие, заметим, что сила трения покоя также постепенно увеличивается до максимального значения $F_{тр\,max}$. Но после того, как брусок начнет двигаться, сила трения станет меньше максимальной силы трения покоя (рис. 61, *b*).

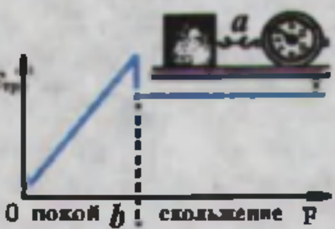



*Рис. 61*

Силу трения, возникающую при движении одного тела по поверхности другого, называют *силой трения скольжения*: направлена она противоположно перемещению тела относительно соприкасающегося с ним тела.

Также, как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе давления (реакции опоры) и зависит от материала соприкасающихся поверхностей:

$$\boxed{F_{тр} = \mu_с N.}$$

Величину $\mu_с$, называют *коэффициентом трения скольжения.*

Коэффициент трения скольжения равен отношению силы трения к силе реакции опоры:

$$\mu_c = \frac{F_{тр}}{N}.$$

Коэффициент трения обычно меньше единицы. В табл. приведены коэффициенты трения скольжения для некоторых материалов.

| Материалы | $\mu_c$ |
|---|---|
| Бронза по чугуну | 0,20-0,21 |
| Дерево по дереву | 0,34-0,40 |
| Сталь по стали | 0,05-0,12 |
| Сталь по меди | 0,015-0,02 |
| Сталь по бронзе | 0,07-0,15 |

**2. Трение катания.** Соберем установку, изображенную на рис. 62. Нагружая чашу, привязанную к нити, мы заметим, что цилиндр начинает катиться под влиянием очень малой силы. Следовательно, трение катящегося цилиндра о горизонтальную плоскость мало.

Вставив в цилиндр шпильку, не дающую ему вращаться, повторим опыт. Мы обнаружим, что для скольжения цилиндра необходимо приложить силу гораздо большую, чем для его катания.

Проделанные опыты говорят о том, что сила трения катания при прочих равных условиях значительно меньше силы трения скольжения. Поэтому в тех случаях, когда надо уменьшить силу трения, *скольжение трущихся поверхностей заменяют катанием по ним колес,*

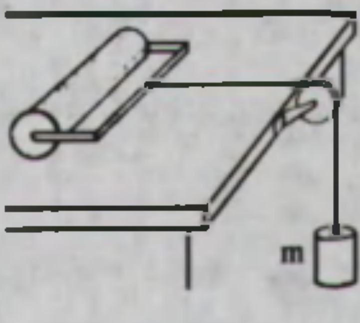


*Рис. 62*

роликов или шариков. Для этой цели используют роликовые и шариковые подшипники.

Возьмем два цилиндра одинакового диаметра, изготовленные из одного и того же материала: один полый, а другой сплошной — и измерим силу трения, испытываемую ими при катании по горизонтальной поверхности. Мы обнаружим, что сила трения тем больше, чем больше сила тяжести цилиндра, т.е. сила трения катания прямо пропорциональна силе давления, а так как сила давления по модулю равна силе реакции опоры, то:

$$F_{кат} \sim N.$$

Возьмем теперь два цилиндра равной массы и длины, но один меньшего радиуса, чем другой. Измерения показывают, что сила трения катания у цилиндра с большим радиусом меньше, чем у цилиндра с малым радиусом:

$$F_{кат} \sim \frac{1}{R}.$$

Объединив результаты опытов, получим:

$$F_{кат} \sim \frac{N}{R}.$$

Чтобы перейти к знаку равенства, надо поставить коэффициент пропорциональности:

$$\boxed{F_{кат} = \mu_{кат} \frac{N}{R}.}$$

● Коэффициент $\mu_{кат}$ называют ***коэффициентом трения качения***.

Из формулы видно, что коэффициент трения катания — величина размерная: он выражается в метрах. Коэффициент трения катания зависит от материала трущихся тел и скорости катания. Так, для стали по стали $\mu_{кат}$ = 0,1-0,2 м, для резины колес автомобиля при движении по асфальту — 2м.

**3. Экспериментальное определение коэффициента трения скольжения.**

*Лабораторная работа №3*

Как было сказано выше, коэффициент трения скольжения равен отношению силы трения к силе давления (реакции опоры):

$$\mu_c = \frac{F_{тр}}{N}.$$

***Цель работы:*** определить массу бруска и силу трения при равномерном движении его по горизонтальной линейке для следующих четырех случаев: 1) один брусок, 2) брусок с одним грузом, 3) брусок с двумя грузами, 4) брусок с тремя грузами.

***Необходимые приборы и материалы:*** брусок с крючком, длинная дошечка или линейка, динамометр, три груза массой по 100 г.

По данным измерений вычислите:

1) коэффициент трения $\mu_c$ в каждом опыте;

2) среднее значение коэффициента трения $\mu_{ср}$ из всех опытов;

3) погрешность определения $\Delta\mu_c$ в каждом опыте;

4) среднюю арифметическую погрешность $\Delta\mu_{ср}$.

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

| № | опыта | $F_{тр}$ | $N$ | $\mu_c$ | $\Delta\mu_c$ | $\mu_{ср}$ | $\Delta\mu_{ср}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |

Запишите значение коэффициента трения скольжения в виде:

$$\mu_c = \mu_{ср} \pm \Delta\mu_{ср}.$$

**?**

**1.** Напишите формулу для силы трения скольжения и поясните значение входящих в нее величин.

**2.** Как сила трения катания зависит от радиуса?

*** Примеры решения задач.**

Силы трения оказывают существенное влияние на движение тел. Как и всякие силы они сообщают телам ускорение. Характерная особенность этого ускорения заключается в том, что оно всегда направлено в сторону, противоположную скорости движения.[1] Рассмотрим несколько примеров решения задач, в которых силы трения играют значительную роль.

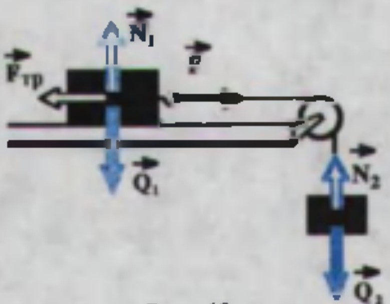



*Рис. 63*

1. На горизонтальном столе лежит брусок массой $m_1 = 5$ кг, к которому привязана легкая нерастяжимая нить, перекинутая через неподвижный блок (рис. 63). К свободному концу нити прикреплено тело массой $m_2 = 2$ кг. Найдите силу натяжения нити. Коэффициент трения бруска о стол равен 0,2. (Трение в блоке не учитывать).

**Анализ условия.** Первый брусок взаимодействует с Землей, столом и нитью. На него действуют сила тяжести $\vec{Q}_1$, сила реакции стола $\vec{N}_1$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила реакции нити $\vec{F}$. Второе тело массой $m_2$ взаимодействует с Землей и нитью. На него действуют сила тяжести $\vec{Q}_2$ и сила реакции нити $\vec{N}_2$.

Возможны три варианта поведения системы. В первом — сила трения покоя $\vec{F}_{тр}$ больше по модулю силы тяжести $\vec{Q}_2$ ($F_{тр} > Q_2$). Система тел покоится относительно стола. Во втором — сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ равна по модулю силе тяжести $\vec{Q}_2$ ($F_{тр} = Q_2$). Система движется равномерно. В третьем случае сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ меньше по модулю силы тяжести $\vec{Q}_2$ ($F_{тр} < Q_2$). Система движется равноускоренно.

---

[1]Сказанное не относится к силам трения покоя (см. § 26).

Найдем интересующие нас силы:

$$F_{тр} = \mu Q_1 = \mu m_1 g;$$

$$F_{тр} = 0{,}2 \cdot 5\ кг \cdot 9{,}8\ \frac{м}{с^2} = 9{,}8\ Н;$$

$$Q_2 = m_2 g;\ Q_2 = 2\ кг \cdot 9{,}8\frac{м}{с^2} = 19{,}6\ Н.$$

Так как $Q_2 > F_{тр}$, то система движется равноускоренно. Из невесомости нити вытекает, что модули сил $\vec{F}_1$ и $\vec{N}_2$ одинаковы. Обозначим этот одинаковый модуль буквой $F$ ($F_1 = N_2 = F$).

Из нерастяжимости нити следует, что система движется как одно целое, а следовательно, модули ускорений тел одинаковы.

**Решение**. 1-й способ. Запишем уравнения движения бруска и тела:

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{Q}_1 + \vec{N}_1 + \vec{F} + \vec{F}_{тр}}{m_1};\ \vec{a}_2 = \frac{\vec{Q}_2 + \vec{N}_2}{m_2}.$$

Чтобы перейти от векторной записи уравнения движения к скалярной, выберем координатные оси так, чтобы ось $OX$ совпала с направлением движения тела массой $m_1$, а ось $OY$ - с направлением движения тела массой $m_2$. Тогда:

$$a_{1x} = \frac{Q_{1x} + N_{1x} + F_{1x} + F_{трx}}{m_1};\ a_{2y} = \frac{Q_{2y} + N_{2y}}{m_2}.$$

Так как $Q_{1x} = 0$, $N_{1x} = 0$, $\vec{F}_{трx} = -\vec{F}_{тр}$, то

$$a_{1x} = \frac{F_{1x} - F_{тр}}{m_1};$$

$$a_{2y} = \frac{Q_{2y} + N_{2y}}{m_2}.$$

Но $|a_{1x}| = |a_{2y}| = a$; $F_{1x} = F$; $Q_{2y} = Q_2$; $N_{2y} = -N_2$.

Поэтому $a_1 = \dfrac{F - F_{тр}}{m_1}$, а $a_2 = \dfrac{Q_2 - N_2}{m_2}$ или

$$\frac{F - F_{тр}}{m_1} = \frac{Q_2 - N_2}{m_2}.$$

Решим полученное уравнение относительно $F$:

$Fm_2 - F_{тр}m_2 = Q_2m_1 - N_2m_1$. Но $N_2 = F$; $Q_2 = m_2g$; $F_{тр} = \mu m_1g$. Поэтому $Fm_2 - \mu m_1gm_2 = m_2gm_1 - Fm_1$; $F(m_1 + m_2) = m_1m_2g\,(1 + \mu)$.

$$F = \frac{m_1m_2g\,(1 + \mu)}{m_1 + m_2}.$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $m_1 = 5$ кг<br>$m_2 = 2$ кг<br>$\mu = 0{,}2$ | $F = \dfrac{2\text{ кг} \cdot 5\text{ кг} \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 \cdot 1{,}2}{2\text{ кг} + 5\text{ кг}} = 16{,}8$ Н. |
| $F = ?$ | **Ответ:** $F = 16{,}8$ Н. |

2-й способ. Сила натяжения нити равна сумме силы, необходимой для преодоления трения тела массой $m_1$ о стол, и силы, сообщающей этому телу ускорение:

$$F = F_{тр} + F_a.$$

Эти силы можно посчитать по формулам:

$$F_{тр} = \mu m_1g;\ F_a = m_1a.$$

Ускорение, с которым движется тело, равно:

$$a = \frac{Q_2 - F_{тр}}{m_1 + m_2} = \frac{m_2g - F_{тр}}{m_1 + m_2}.$$

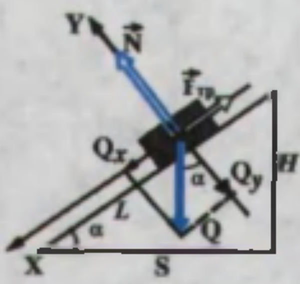


Рис. 64

Сила, сообщающая телу массой $m_1$ ускорение, равна:

$$F_a = m_1\,\frac{m_2g - F_{тр}}{m_1 + m_2}.$$

По полученным соотношениям вычислим силы.

**Вычисления.**

$F_{тр} = 0{,}2 \cdot 5\text{ кг} \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 = 9{,}8$ Н;

$$F_a = 5\text{ кг} \cdot \frac{2\text{ кг} \cdot 9{,}8\text{ м/с}^2 - 9{,}8\text{ Н}}{2\text{ кг} + 5\text{ кг}} = 7\text{ Н};$$

$F = 9{,}8\text{ Н} + 7\text{ Н} = 16{,}8\text{ Н}.$

2. С каким ускорением скользит по наклонной эстакаде ящик (рис. 64), если высота эстакады $H = 8$ м, а ее длина — 10 м? Коэффициент трения скольжения ящика по эстакаде равен 0,5.

**Анализ условия.** На ящик действуют три силы: сила тяжести $\vec{Q}$, сила реакции $\vec{N}$, перпендикулярная к эстакаде, и сила трения $\vec{F}_{тр}$, направленная против движения ящика.

**Решение.** По второму закону Ньютона:

$\vec{a} = \dfrac{\vec{Q} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}}{m}$. Систему координат расположим так, чтобы ось $OX$ была направлена вдоль наклонной плоскости, а ось $OY$ перпендикулярно к ней. Запишем уравнение движения через проекции сил и ускорений:

$$a_x = \frac{Q_x + N_x + F_{тpx}}{m}.$$

Но $a_x = a$; $N_x = 0$;

$F_{тpx} = -F_{тp}$; $Q_x = Q\sin\alpha = mg\sin\alpha$; $Q_y = mg\cos\alpha$.

Поэтому:

$$a = \frac{mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha}{m} = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha).$$

$$\sin\alpha = \frac{H}{L};\ \cos\alpha = \frac{s}{L};\ s = \sqrt{L^2 - H^2}.$$

Поэтому:

$$a = g\left(\frac{H}{L} - \mu\frac{s}{L}\right) = \frac{g}{L}\left(H - \mu\sqrt{L^2 - H^2}\right).$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $L = 10$ м<br>$H = 8$ м<br>$\mu = 0{,}5$ | $a = \dfrac{9{,}8\text{м/с}^2}{10\text{ м}}\left(8\text{м} - 0{,}5\sqrt{100\text{ м}^2 - 64\text{ м}^2}\right) = 4{,}9\dfrac{\text{м}}{\text{с}^2}.$ |
| $a = ?$ | **Ответ:** $a = 4{,}9$ м/с$^2$. |

## § 28. ДИНАМИКА ТЕЛ, ДВИЖУЩИХСЯ ПО ОКРУЖНОСТИ

Мы до сих пор изучали динамику прямолинейно движущихся тел. Но в окружающем нас мире очень многие тела движутся либо по окружности (например, обод велосипедного колеса, ручка ручной швейной машины, некоторые спутники Земли, летчики на тренировочной центрифуге и т.д.), либо по части окружности (например, качели, автомобиль по выпуклому мосту, движущиеся по закруглению дороги автомобили и т.д.).

Поэтому необходимо изучить динамику движения тел, движущихся по окружности.

**1. Центростремительная сила.** При равномерном движении тела по окружности его скорость, оставаясь постоянной по модулю, непрерывно изменяется по направлению. Изменение скорости по направлению свидетельствует о том, что тело движется с ускорением. В §17 было установлено, что это ускорение направлено к центру окружности, по которой движется тело. Поэтому ускорение назвали центростремительным.

Но ускорение вызывается силой. Следовательно, на тело, движущееся по окружности, действует сила, направленная к центру окружности. Силу назвали *центростремительной*. С этой силой на движущееся по окружности тело действует связь. Например, на спортивный снаряд "молот" действует трос, удерживаемый спортсменом (рис. 65). По второму закону Ньютона $F_{цс} = ma_{цс}$.

Так как центростремительное ускорение $a_{цс} = \frac{v^2}{R}$ или $a_{цс} = \omega^2 R$, то центростремительная сила равна:

$$\boxed{F_{цс} = \frac{mv^2}{R}} \text{ или } \boxed{F_{цс} = m\omega^2 R}$$

**2. Центробежная сила.** По третьему закону Ньютона всякое действие вызывает равное и противоположно направленное противодействие. Центростремительной силе, с которой связь действует на тело, противодействует равная по модулю и противоположно направленная сила, с которой тело действует на связь. Эту силу назвали *центробежной*, так как она направлена по радиусу от центра окружности. Центробежная сила равна по модулю центростремительной:

Рис. 65

$$\boxed{F_{цб} = \frac{mv^2}{R}} \quad \text{или} \quad \boxed{F_{цб} = m\omega^2 R}.$$

Действие центробежной силы мы испытываем, например, когда едем в автобусе по крутому повороту дороги. С этой силой мы давим на стенку, противоположную центру закругления дороги.

Центробежная сила заставляет слетать грязь с колес движущихся автомобилей (см. рис. 37, *b*), раскаленные частицы металла — с наждачного диска. Эта же сила сжимает вращающийся гибкий обруч (рис. 66). В период формирования Земли как планеты центробежная сила повлияла и на форму Земли: Земля — не правильный шар, а слегка сплюснутый (геоид). Экваториальный радиус Земли ≈ 6378 км, а полярный ≈ 6356 км.

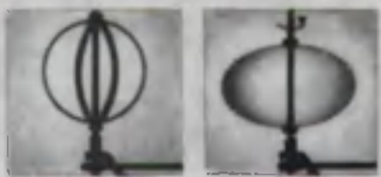
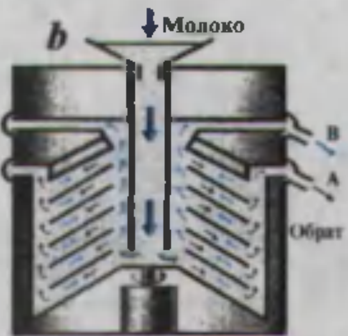


Рис. 66



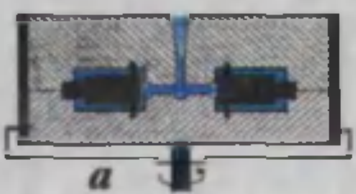




Рис. 67

**3. Использование центробежных сил в технике.** Центробежные силы находят широкое применение в современной технике. Рассмотрим некоторые примеры.

Центробежное литье — способ получения пустотелых отливок в металлических формах. Для получения таких отливок расплавленный металл заливается во вращающуюся форму. Под действием центробежной силы металл прижимается к стенкам формы и заполняет все пустоты. На рис. 67, *а* показана схема отливки пустотелых шаров.

Сепаратор молочный (рис. 67, *b*) служит для отделения из молока сливок и обрата. Основной частью сепаратора является стальной барабан, вращающийся с частотой 4-8 тыс. оборотов в минуту. Внутри барабана располагаются конические тарелки с отверстиями. Молоко, протекая через отверстия в тарелках, под действием центробежной силы разделяется на обрат и сливки. Плотность сливок меньше, чем плотность обрата. Поэтому обрат отбрасывается к стенкам барабана и стекает в приемник *А*, а сливки остаются ближе к оси вращающегося цилиндра и стекают в приемник *Б*.

*Рис. 68*

Центрифуга — сложное устройство, предназначенное для тренировок и испытаний летчиков, космонавтов и аппаратуры, подвергающейся в ходе испытаний значительным механическим перегрузкам (рис. 68).

## § 29. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Допустим, что на берегу полноводной равнинной без поворотов реки и в трюме баржи, плывущей по течению этой реки с постоянной скоростью, оборудованы две совершенно одинаковые лаборатории для изучения механических явлений. Лаборатории оснащены абсолютно одинаковыми приборами для измерения расстояний, вре-

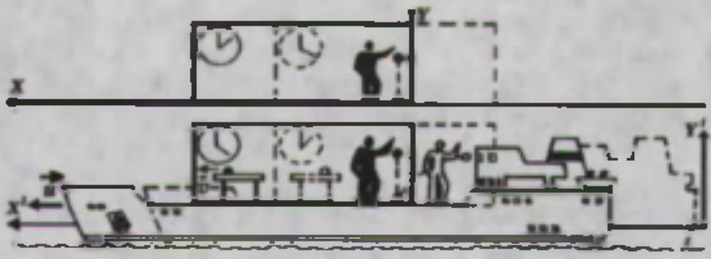



*Рис. 69*

мени, массы, силы, ускорения и т.д. Допустим также, что баржа плывет со скоростью $\vec{u}$ относительно берегов и не испытывает никакой качки (рис. 69).

Системы отсчета, связанные с лабораториями, обозначим $XY$ и $X'Y'$. Эти системы инерциальны. Возникает вопрос: равноправны ли они?

**1. Мысленный опыт Галилея.** Галилей, отвечая на этот вопрос, привел такой пример:

"Уединитесь с каким-нибудь приятелем в просторное помещение под палубой большого корабля и пустите туда мух, бабочек и других подобных мелких летающих насекомых. Пусть там находится также большой сосуд с водой и плавающими в нем рыбками. Подвесьте далее наверху ведерко, из которого капля за каплей вытекала бы вода в другой сосуд с узким горлышком, подставленный снизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте старательно, как мелкие летающие живые существа с одной и той же скоростью летают во всех направлениях внутри помещения. Рыбки, как вы увидите, будут плавать в поставленном сосуде. Бросая приятелю какую-нибудь вещь, вам не придется применять большую силу, чтобы бросить ее в одну сторону, чем в другую, если только вещь бросается на одни и те же расстояния. Прыгая двумя ногами, вы сделаете прыжок на одно и то же расстояние, независимо от его направления. Наблюдайте хорошенько за всем этим, хотя у нас не возникает никакого сомнения: происходит именно так. Заставьте теперь корабль привести в движение с какой угодно скоростью. Если движение будет равномерным и без качки в ту и другую сторону, то во всех указанных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит на месте".

Далее Галилей описывает, как будут протекать на движущемся корабле все явления, рассмотренные выше. Он замечает, в частности, что если бросить с одинаковой скоростью (относительно корабля) один и тот же предмет сначала к корме, а затем к носу корабля, то в первом случае предмет пройдет относительно пола корабля такое же расстояние, как и во втором, хотя за время, пока предмет находится в воздухе, пол движущегося корабля успеет переместиться навстречу предмету. Аналогичные замечания делаются им и в отношении остальных явлений. Отмечая независимость всех явлений, наблюдаемых в закрытом помещении под палубой корабля, от равномерного движения последнего, Галилей пришел к выводу, что две инерциальные системы отсчета, движущиеся относительно друг друга прямолинейно и равномерно, равноправны.

**2. Время, перемещение и скорость в разных инерциальных системах отсчета.** Принцип относительности Галилея утверждает полное равноправие всех инерциальных систем отсчета. Однако это не означает, что одно и то же движение в разных инерциальных системах отсчета одинаково.

Допустим, что лаборатории, расположенные на берегу и в трюме равномерно плывущей баржи, имеют по прозрачной стене и наблюдатели одной из них видят все, что происходит в другой.

Наблюдатели прежде всего отметят, что их часы идут одинаково. Иными словами, время в инерциальных системах отсчета инвариантно (неизменно): $t' = t$.

Допустим, что в обеих лабораториях происходит падение шариков. Следя за их падением, наблюдатель в лаборатории на барже заметит, что его шарик падал по вертикали и упал за время $t$. Наблюдатель, находящийся на берегу, увидит, что шарик на барже падал по параболе и время его падения также равно $t$.

Следовательно, траектория движения зависит от системы отсчета, в которой это движение изучается, а время не зависит.

Пусть в лаборатории, расположенной на барже, по направлению ее движения с постоянной скоростью катится шарик (см. рис. 69). Наблюдатель внутри этой лаборатории определит, что скорость движения шарика $\vec{v}$. Наблюдатель, находящийся на берегу, будет считать, что скорость шарика $\vec{v}'$, причем $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}$, где $\vec{u}$ - скорость движения баржи.

Полученная формула выражает *закон сложения скоростей*, из которого следует, *что скорость движения зависит от системы отсчета, в которой это движение изучается*.

Далее наблюдатель на барже определит, что за время $t$ шарик переместится на расстояние $\vec{s} = \vec{v}t$, а наблюдатель на берегу найдет, что перемещение шарика будет $\vec{s}'$, причем:

$$\vec{s}' = \vec{v}'t = (\vec{v} + \vec{u})\, t = \vec{v}t + \vec{u}t = \vec{s} + \vec{u}t,$$

т.е. перемещение тела зависит от системы отсчета, в которой изучается движение.

Соотношения $\left.\begin{aligned} t' &= t \\ \vec{v}' &= \vec{v} + \vec{u} \\ \vec{s}' &= \vec{s} + \vec{u}t \end{aligned}\right\}$ получили название преобразований Галилея.

**3. Масса, ускорение и сила в разных инерциальных системах отсчета.** По определению (см. §19) масса — величина постоянная, являющаяся мерой инертности тела. От переноса тела на движущуюся баржу (или с баржи) его масса измениться не может, *поэтому масса тела остается неизменной во всех инерциальных системах отсчета $m' = m$.*

Допустим, что в лаборатории, расположенной на барже, тело взаимодействует с другим телом и в результате получает ускорение, которое можно определить по формуле $\vec{a}' = \dfrac{\vec{v}' - \vec{v}'_0}{t'}$, но $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}$; $\vec{v}'_0 = \vec{v}_0 + \vec{u}$; $t' = t$.

Поэтому:

$$\vec{a}' = \frac{\vec{v} + \vec{u} - (\vec{v}_0 + \vec{u})}{t'} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \vec{a}.$$

● Таким образом, *модуль ускорения неизменен во всех инерциальных системах отсчета.*

Сила, сообщающая телу ускорение, не зависит от системы отсчета: она определяется взаимодействием тел. Поэтому:

$$\vec{F}' = \vec{F}.$$

Итак, время, масса, ускорение и сила в механике Ньютона одинаковы (инвариантны) во всех инерциальных системах отсчета.

**4. Формулировка принципа относительности Галилея.** Так как сила, ускорение и масса при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой не изменяются, то можно построить следующую цепочку рассуждений:

$$\vec{F}' = \vec{F};\ \vec{a}' = \vec{a};\ m' = m,\ \text{а}\ \vec{F} = m\vec{a},\ \text{то}$$
$$\vec{F}' = \vec{F} = m\vec{a}\ \text{ или }\ \vec{F}' = m\vec{a}'.$$

Полученное уравнение выражает второй закон Ньютона в системе отсчета, связанной с баржей. Мы видим, что это уравнение не изменилось при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Кроме того, мы знаем, что во всех инерциальных системах справедлив закон инерции.

Добавив к этому знание о том, что взаимодействие двух тел не зависит от системы отсчета, мы можем сформулировать *принцип относительности Галилея* так:

*Все инерциальные системы равноправны — это проявляется в том, что законы механики в них записывают одинаково.*

?

1. В чем сущность принципа относительности Галилея?
2. Напишите преобразования Галилея и поясните их.
3. Какие величины постоянны во всех инерциальных системах отсчета, а какие зависят от системы отсчета?
4. В чем проявляется равноправность инерциальных систем отсчета?

### *Упражнение 6*

**1.** К стальному ящику массой 600 кг, стоящему на бетонном полу, приложена в горизонтальном направлении постоянная сила, равная 1000 Н. Будет ли под действием такой силы ящик двигаться? Если да, то как – равномерно или ускоренно? Коэффициент трения стали о бетон принять равным 0,3.

**2.** Лошадь развивает силу тяги 800 Н. Какой максимальный груз она может везти по горизонтальной дороге на санях, масса которых 100 кг, если коэффициент трения полозьев о снег равен 0,02? (Ответ: $m = 3982$ кг).

**3.** Автомобиль движется по горизонтальной дороге со скоростью 54 км/ч. Какое расстояние он пройдет после выключения двигателя, если коэффициент трения равен 0,1? (Ответ: $s \approx 225$ м).

**4.** Пуля, вылетающая из ствола винтовки со скоростью 800м/с, должна была бы подняться на высоту 32000 м ($H = \dfrac{v^2}{2g}$), а фактически поднимается лишь на высоту до 4000 м. Объясните, почему это происходит.

**5.** Стальная деталь, изображенная на рис. 70, *a*, под действием силы $F$ равномерно перемещается по стальной горизонтальной плоскости. Какую силу надо приложить (большую, меньшую, равную $F$) для перемещения этой детали в положениях "*b*" и "*d*"? Ответ обосновать.

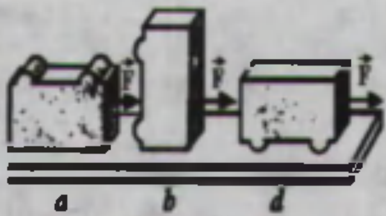


**Рис. 70**

**6.*** Удобный метод измерения коэффициента трения покоя состоит в следующем. Тело кладется на наклонную плоскость. Плавно увеличивая угол $\alpha$ наклона плоскости, определяют минимальный угол наклона, при котором начинается скольжение тела. Найдите связь между углом наклона плоскости и коэффициентом трения покоя ($\mu = \operatorname{tg}\alpha$).

**7.*** Положите длинную линейку (или любой стержень) на указательные пальцы так, чтобы линейка была горизонтальной. Приблизьте пальцы друг к другу. Около какой точки они сойдутся? Ответ обосновать.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ VI

1. При соприкосновении поверхностей двух тел возникают силы, препятствующие движению тел, которые получили название сил трения.

2. Сила трения возникает и при относительном движении соприкасающихся поверхностей (сила трения скольжения), и при их относительном покое (сила трения покоя), когда действующая на тело сила меньше силы трения покоя.

3. Сила трения скольжения зависит от материала трущихся поверхностей, их обработки и от силы давления (силы реакции опоры): $F_{тр} = \mu N$, где $\mu$ - коэффициент трения скольжения, $N$ - сила реакции соприкасающихся поверхностей. Коэффициент трения скольжения определяется экспериментально.

4. В том случае, когда одно тело имеет цилиндрическую или шаровую форму и катится по поверхности другого тела, возникают силы трения катания. Сила трения катания может быть вычислена по формуле:

$$F_{кат} = \mu_{кат} \frac{N}{R},$$

где $\mu_{кат}$ — коэффициент трения катания, $N$ - сила реакции, $R$ - радиус катящегося тела.

5. При движении тел в жидкости или газе возникает сила сопротивления, при небольших скоростях пропорциональная скорости:

$$F_{сопр} = kv,$$

где $k$ - коэффициент сопротивления, зависящий от свойств среды, формы, размеров тела и состояния (обработки) поверхности. Направлена сила сопротивления противоположно скорости.

При больших скоростях сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_{сопр} = kv^2.$$

# Глава VII. ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

Ньютон, опираясь на известные ему факты, в числе которых было знание законов движения Луны вокруг Земли и падение всех тел на Землю, поставил перед собой задачу: определить силу, которая удерживает Луну на круговой орбите.

Решение этой задачи — яркий пример решения одной из важнейших задач динамики: по закону движения тела определить действующие на него силы. В этой главе вы узнаете много интересного, связанного прямо или косвенно с открытием, сделанным Ньютоном.

## §30. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

**Всемирное тяготение.** Повседневные наблюдения убеждают нас в том, что все тела притягиваются к Земле. Но тела притягиваются не только к Земле, но и друг к другу. В этом можно убедиться на следующем (очень простом по идее и сложном по постановке) опыте. К легкому стержню прикрепляют свинцовые шарики *C* (рис. 71). Стержень подвешивают на прочной нити. Если к шарикам *C* пододвинуть очень близко массивные тела *B*, то они притянутся. О притяжении тел можно судить по повороту стержня.

В 1667 г., анализируя материалы астрономических наблюдений, Ньютон применил сформулированные им законы динамики к движению Луны. Ему было известно, что Луна обращается вокруг Земли почти по круговой орбите (рис. 72). Но движение по круговой орбите возможно только тогда, когда на тело действует какая-то сила, сообщающая ему центростремительное ускорение. Если бы такой силы не было, Луна, в соответствии с законом инерции, двигалась бы прямолинейно и равномерно. Ньютон высказал предположение, что этой силой является сила взаимного притяжения Луны и Земли. Произведя необходимые расчеты, он пришел к выводу, что силу взаимного притяжения Луны и Земли можно вычислить по формуле:

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

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

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

Закон всемирного тяготения можно сформулировать следующим образом:

*Два тела (рассматриваемые как материальные точки) притягиваются друг к другу по прямой, их соединяющей, с силами, прямо пропорциональными произведению их масс и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними:*

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

В формулировке закона после слова "тела" в скобках указано "рассматриваемые как материальные точки". Это означает, что закон справедлив лишь тогда, когда геометрические размеры тел малы по сравнению

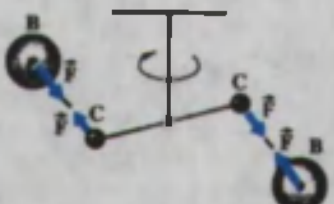



Рис. 71

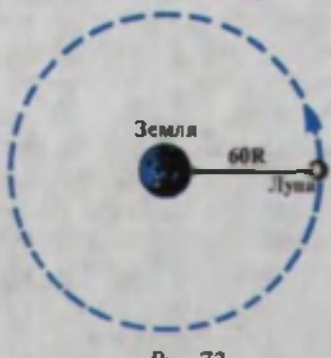



Рис. 72

[1]От латинского слова gravitas - тяготение, тяжесть.

нию с расстоянием между ними и их можно принять за материальные точки. Однако закон справедлив и для больших однородных шаров, находящихся на небольших расстояниях. В этом случае массу шаров следует считать сосредоточенной в их центре.

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

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2}, \text{ откуда } G = \frac{FR^2}{m_1 m_2}.$$

Допустим, что на расстоянии 1 м находятся две материальные точки массой по 1 кг каждая. *Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга;* ее размерность:

$$[G] = 1\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Численное значение гравитационной постоянной может быть найдено из опыта. Существуют несколько способов его нахождения. Рассмотрим один из них.

К одной из чаш очень чувствительных весов на длинной нити подвесили полый шар, наполненный ртутью, и уравновесили весы (рис. 73). Затем под шар с ртутью подвели свинцовый шар большой массы. Равновесие весов нарушилось, что свидетельствовало о действии сил притяжения. Чтобы восстановить равнове-

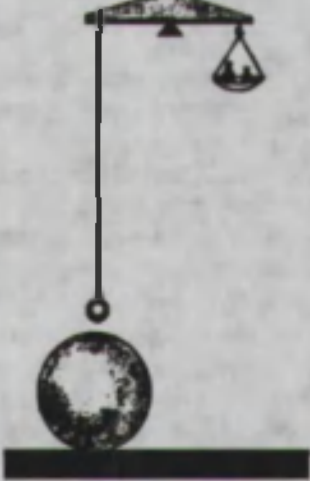


*Рис. 73*

сие, на правую чашу весов добавили грузы, сила тяжести которых была равна силе притяжения шаров. Определив экспериментально силу притяжения, вычислили гравитационную постоянную.

Опыты, аналогичные описанному, и другие, в ходе которых измерялась сила притяжения двух тел, ставились многократно. В результате получено следующее значение гравитационной постоянной:

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

Это очень малая величина, которую иногда удобно представить в виде простой дроби:

$$G = \frac{1}{15000000000} \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} = \frac{1}{15} \cdot 10^{-9}\ \frac{\text{N} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

?

1. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
2. Что такое гравитационная постоянная? Каково ее значение?
3. Как можно определить числовое значение гравитационной постоянной?
а) исходя из опыта;
б) теоретически.

## §31°. ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ.

**1. Гравитационное поле.** Итак, все тела во Вселенной притягиваются друг к другу. Но как это притяжение осуществляется? Установлено, что вокруг каждого тела существует его своеобразное материальное продолжение — невидимое гравитационное поле, называемое также *полем тяготения*. Поле тяготения мы не видим, но его действие, например, притяжение к Земле, ощущаем.

Гравитационное поле вокруг тела неодинаково: оно сильнее всего вблизи тела и постепенно ослабевает по мере удаления от него. Поэтому, чем дальше от нас какое-либо тело, тем слабее его притяжение.

Гравитационное поле зависит от массы создавшего его тела: чем больше масса тела, тем сильнее его гравитационное поле, и, наоборот, чем меньше масса тела, тем слабее его гравитационное поле. Например, Земля через свое гравитационное поле притягивает человека массой 61 кг на расстоянии 6370 км (радиус Земли) с силой примерно в 600 Н. А два человека массой по 61 кг каждый взаимодействуют на расстоянии 1 м с силой:

$$F = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot \frac{61\ \text{кг} \cdot 61\ \text{кг}}{1\ \text{м}^2} = 2{,}5 \cdot 10^{-7}\text{Н}.$$

Поэтому в повседневной жизни мы не наблюдаем притяжения окружающих нас тел и нас самих друг к другу.

Не следует смешивать гравитационное поле с электрическим и магнитным полями. Электрическое поле существует только вокруг наэлектризованных тел, магнитное поле — только вокруг проводников с током и магнитов, а *гравитационное поле существует вокруг всех тел.*

Интересная особенность гравитационного поля — его всепроникающая способность: *оно проникает через все материалы.* От электрического поля можно защититься с помощью проводящих электрические заряды экранов, от магнитного — с помощью экранов, изготовленных из железа или других магнитных материалов, а от гравитационного поля защититься нельзя. Да и не нужно: человек появился и стал тем, кем он есть в гравитационном поле, и оно нам, а также животным и растениям необходимо для нормальной жизни.

**2. Масса — мера гравитации.** Понятие массы было первоначально введено при изучении инертных свойств тел как мера этих свойств. В законе всемирного тяготения проявляется другое свойство тел — свойство взаимного притяжения и масса выступает в новой роли — в качестве меры тяготения. Тела с малой массой притягиваются друг к другу с меньшей силой, чем тела с большей массой, находящиеся на таком же расстоянии.

Массу тел, найденную по силе притяжения к другим телам, называют *гравитационной массой.*

Таким образом, *масса одновременно выступает и как мера инертности тел, и как мера их гравитации (притяжения).*

**3. Сравнение масс тел через силы их притяжения к Земле.** Измеряя массу тела по ускорению, которое оно приобретает в процессе взаимодействия, мы определяем инертную массу $m$. Для сравнения гравитационных масс можно использовать притяжение к Земле эталона массы и тела, массу которого надо определить.

Допустим, что пружинным динамометром мы измерили силу $F$ притяжения к Земле тела, масса которого $m$ известна. Затем с помощью этого же динамометра мы измерили силу $F'$ притяжения к Земле тела, массу которого $m'$ хотим узнать. По закону всемирного тяготения:

$$F = G\frac{mM_З}{R^2} \quad \text{и} \quad F' = G\frac{m'M_З}{R^2},$$

где $M_З$ — масса Земли; $R$ - радиус Земли.

Поэтому $\frac{F}{F'} = \frac{m}{m'}$, откуда $m' = \frac{F'}{F}m.$

Многочисленные опыты, поставленные в лучших физических лабораториях мира, показали *равенство гравитационной и инертной масс тела.*

Подводя итог всему, что вы узнали о массе, можно дать следующее определение:

*Массой называют скалярную величину, характеризующую инертные и гравитационные свойства тел и являющуюся мерой этих свойств.*

?

1. Что отличает гравитационное поле от электрического и магнитного полей?
2. Где гравитационное поле сильнее — вблизи тела или вдали от него?
3. Одинаково ли действие гравитационного поля на тела разной массы? Ответ обосновать.
4. Что называют массой тела?

* **Примеры решения задач.**

Закон всемирного тяготения является фундаментальным законом природы. С его помощью можно вычислять массы небесных тел, рассчитывать траектории искусственных спутников Земли и решать ряд других научных и практических задач. Ниже приведены примеры решения однотипных, но разных задач.

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

**Анализ условия.** Все тела притягиваются к Земле. Силу притяжения можно выразить двумя способами:

$$F = mg \quad \text{и} \quad F = G\,\frac{m\,M_З}{R^2}.$$

**Решение.** Приравняв правые части написанных выше равенств, находим $M_З$:

$$mg = G\,\frac{mM_З}{R^2}, \quad \text{откуда} \quad M_З = \frac{gR^2}{G}.$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $R = 637 \cdot 10^6$ м<br>$g = 9{,}81$ м/с$^2$<br>$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Нм$^2$/кг$^2$ | $M_З = \dfrac{9{,}81\text{ м/с}^2 \cdot 6{,}37^2 \cdot 10^8\text{м}^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2} =$ |
| $M_З = ?$ | $= \dfrac{9{,}81 \cdot 405769 \cdot 10^{19}}{6{,}67}$ кг $\approx 5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг. |

**Ответ:** $M_З \approx 5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг.

**2.** Рассчитайте массу Солнца, если известно, что Земля, находясь на расстоянии $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м, совершает один оборот вокруг него за 365,25 сут.

**Анализ условия.** Земля обращается вокруг Солнца почти по круговой орбите. Центростремительное ускорение Земле сообщается силой ее притяжения к Солнцу: $F = G\,\dfrac{M_С M_З}{R^2_{ОЗ}}$, поэтому $a_З = \dfrac{F}{M_З} = G\,\dfrac{M_С}{R^2_{ОЗ}}$.

Из полученной формулы определяем массу Солнца: $M_С = \dfrac{a_З R^2_{ОЗ}}{G}$. Центростремительное ускорение

Земли при ее движении вокруг Солнца:

$$a_З = \frac{v^2}{R_{ОЗ}},$$

где $v$ — линейная скорость обращения Земли.

**Решение.** Подставив значение центростремительного ускорения в формулу для расчета массы Солнца, получим $M_С = \frac{v^2 R_{ОЗ}}{G}$. Но $v = \frac{2\pi R_{ОЗ}}{T}$, поэтому $M_С = \frac{4\pi^2 R^3_{ОЗ}}{GT^2}$.

**Вычисления.**

$R_{ОЗ} = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м
$T = 365{,}25 \cdot 86400$ с
$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Нм²/кг²

$M_С = ?$

$$M_С = \frac{4 \cdot 3.14^2 \cdot (1{,}50 \cdot 10^{11}\text{м})^3}{(365{,}25 \cdot 86400\text{с})^2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2} = \frac{4 \cdot 9{,}8 \cdot (1{,}5)^3 \cdot 10^{33}}{(3{,}3 \cdot 10^7)^2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}}\ \text{кг} = 2 \cdot 10^{30}\text{кг}.$$

**Ответ:** $M_С = 2 \cdot 10^{30}$ кг.

3. Определите массу Луны, если известно, что искусственный спутник "Луна-15" обращался вокруг нее почти по круговой орбите радиусом 1890 км с периодом 2 ч 3 мин 30 с.

**Анализ условия.** Центростремительное ускорение сообщается спутнику силой всемирного тяготения:

$$F = G\frac{M_Л m}{R^2}, \text{ поэтому } a = \frac{F}{m} = \frac{GM_Л}{R^2}.$$

Центростремительное ускорение спутника Луны можно выразить кинематически: $a = \frac{v^2}{R}$, где $v$ - линейная скорость спутника.

**Решение.** Приравняв два выражения центростремительного ускорения, получим

$\frac{GM_Л}{R^2} = \frac{v^2}{R}$, откуда $M_Л = \frac{v^2 R}{G}$, и, поскольку $v = \frac{2\pi R}{T}$,

масса Луны равна: $M_Л = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$.

**Вычисления.**

$R = 1890 \cdot 10^3$ м
$T = 7410$ с
$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Нм²/кг²

$M_л = ?$

$$M_л = \frac{4 \cdot 3{,}14^2 (1890 \cdot 10^3 \text{ м})^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2 \cdot 7410^2 \text{ с}^2} \approx$$

$\approx 7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг.

**Ответ:** $M_л = 7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг.

(Масса Луны примерно в 81 раз меньше массы Земли).

## §32. СИЛА ТЯЖЕСТИ. ВЕС ТЕЛА

**1. Сила тяжести.** Сила тяжести и вес — два взаимосвязанных понятия. Рассмотрим их.

Любое тело на Земле притягивается к ней. Если Землю считать однородным шаром, то силу притяжения можно рассчитать, пользуясь формулой закона всемирного тяготения:

$$F = G\frac{mM_з}{R^2}.$$

Эта сила приложена к центру массы тела и направлена по радиусу к центру массы Земли (рис. 74, *a*).

Каждое тело на Земле участвует в ее суточном вращении вокруг оси. С точки зрения внеземного наблюдателя, связанного с инерциальной системой отсчета, на все тела, находящиеся на Земле, действует цен-

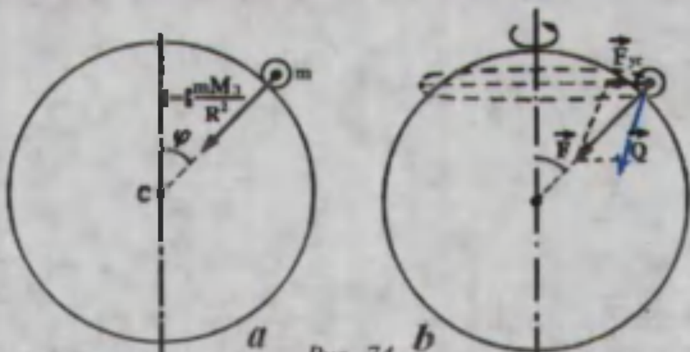



*Рис. 74*

тростремительная сила $F_{цс}$, направленная перпендикулярно оси вращения (рис. 74, *b*). Эта сила вызывается притяжением тел к Земле.

*Векторную разность между силой притяжения тела к Земле и центростремительной силой, вызванной его обращением вокруг земной оси:*

$$\vec{Q} = \vec{F} - \vec{F}_{цс},$$

*называют силой тяжести.*

Центростремительная сила равна: $F_{цс} = ma$, но $a = \dfrac{v^2}{r} = \omega^2 r$. Поэтому $F_{цс} = mr\omega^2$, где $r$ - радиус обращения тела, $\omega$ — угловая скорость вращения Земли. Так как центростремительная сила зависит от $r$ обращения, то сила тяжести зависит от географической широты и на всех точках земной поверхности, кроме полюсов, меньше силы тяготения. Так как угловая скорость вращения Земли мала ($\omega \approx 0{,}08$ рад/с), то $F_{цс} \ll F$, поэтому сила тяжести $Q$ мало отличается от силы притяжения Земли и по модулю, и по направлению: $\vec{Q} \approx \vec{F}$.

● Точку приложения силы тяжести называют *центром тяжести тела*. Положение центра тяжести тела совпадает с его центром масс.

**2. Ускорение свободного падения.** Сила тяжести сообщает всем телам, находящимся в данном месте земной поверхности, одинаковое ускорение $g$, которое, как вам известно, называют ускорением свободного падения: $\vec{g} = \dfrac{\vec{Q}}{m}$. Но $\vec{Q} \approx \vec{F}$, поэтому

$$g = \frac{F}{m} = \frac{G\dfrac{mM_з}{R^2}}{m} = \frac{GM_з}{R^2}.$$

Так как сила тяжести $Q$ зависит от географической широты, то и ускорение свободного падения также зависит от географической широты места. Так, на полюсе ускорение свободного падения равно 9,83 м/с$^2$.

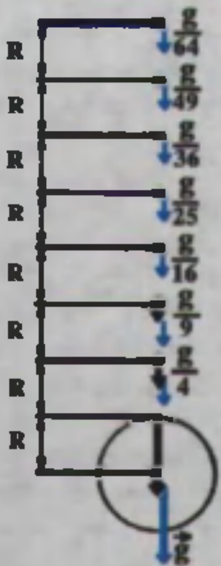
на экваторе — 9,78 м/с², а на широте 45° - 9,81 м/с². Так как сила тяготения зависит от расстояния, то тело массой $m$, поднятое на высоту $h$ над поверхностью Земли, притягивается к Земле с силой:

$$F = G\frac{mM_З}{(R+h)^2}.$$

Поэтому ускорение свободного падения изменяется при удалении от земной поверхности. Если тело находится на высоте $h$ над поверхностью Земли, то выражение для ускорения свободного падения нужно писать в виде:

$$g = \frac{GM_З}{(R+h)^2}.$$

На рис. 75 показана зависимость ускорения свободного падения от расстояния тела до поверхности Земли. Из графика и формулы видно, что на расстоянии, равном 4R, оно уменьшается примерно в 25 раз! Уже на высоте 300 км (на широте 45°) ускорение свободного падения уменьшается на 0,86 м/с² и равно 8,95 м/с².



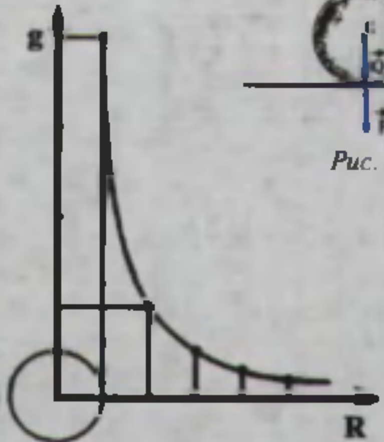



Рис. 75

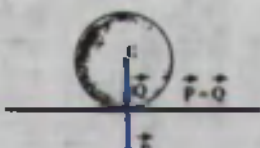


Рис. 76

Из приведенной формулы следует, что при высотах над Землей в несколько сотен метров можно считать ускорение $g$ постоянным, не зависящим от положения тела.

**3. Вес.** Допустим, что какое-либо тело, например, шар, лежит на горизонтальной опоре (рис. 76). Шар взаимодействует с Землей и, если бы был свободным, под действием силы тяжести падал бы на Землю с ускорением $g$. Но падению шара препятствует опора.

Шар и опора взаимодействуют. Шар действует на опору с силой $P$, равной по модулю силе тяжести $Q$, а опора на шар — с равной по модулю, но противоположно направленной силой реакции опоры $N$.

*Силу $P$, с которой тело (вследствие его притяжения к Земле) действует на опору, называют весом.*

Важно понять и запомнить, что *вес — это сила, приложенная к опоре, а не к телу. К телу приложены лишь сила тяжести и реакция опоры, уравновешивающие друг друга.*

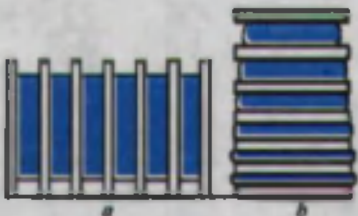


*Рис. 77*

Взаимодействие тела с опорой приводит к их деформации: нижние части тела под действием верхних сжимаются. На рис. 77, *а* изображена лежащая на боку башенка, этажи которой сделаны из поролона, а межэтажные перекрытия — стальные. На рис. 77, *b* эта же башенка представлена стоящей. Хорошо видно, что у стоящей башенки нижние этажи (поролоновые прокладки) деформированы сильнее верхних.

Тело каждого из нас в результате взаимодействия с опорой также деформируется. Мы воспринимаем эту деформацию как весомость. Отсюда и произошло обыденное выражение "вес тела", хотя вес — это сила, приложенная не к телу, а к опоре.

1. Какую силу называют силой тяжести?
2. Ускорение свободного падения не зависит от массы тел. А сила тяжести?
3. От каких величин зависит ускорение свободного падения?
4. Какую величину называют весом?

## §33. ПЕРЕГРУЗКИ И НЕВЕСОМОСТЬ

Вес и сила тяжести – это две разные силы, они приложены к разным телам и, как будет показано ниже, могут быть неравными. Покажем это.

**1. Перегрузки.** Подвесим к подвижному динамометру тело массой $m$ (рис. 78, *a*). На тело действует сила тяжести $\vec{Q}$, приложенная к центру массы тела, и сила реакции подвеса (динамометра) $\vec{N}_0$. На пружину динамометра действует вес тела $\vec{P}_0$. По третьему закону Ньютона:

$$\vec{P}_0 = -\vec{N}_0.$$

Около букв $\vec{P}$ и $\vec{N}$, обозначающих вес тела и силу реакции пружины, мы поставили “нулевые” индексы для того, чтобы подчеркнуть, что тело и динамометр покоятся относительно системы отсчета, связанной с Землей.

Резко поднимем динамометр вверх. Мы заметим, что в момент подъема стрелка его опустилась, следовательно, вес тела увеличился (рис. 78, *b*). Выясним, почему это произошло.

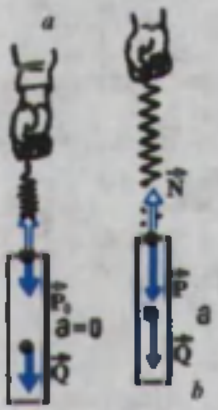


*Рис. 78*

Подняв резко динамометр вверх, мы заставим тело двигаться с ускорением. В этом случае на него действуют сила тяжести $\vec{Q}$, направленная вертикально вниз, и сила реакции деформированной пружины $\vec{N}$, направленная вертикально вверх. Равнодействующая этих сил $\vec{R} = \vec{N} - \vec{Q}$, согласно второму закону Ньютона, сообщает телу ускорение (в проекции на вертикальное направление):

$$\vec{a} = \frac{\vec{N} - \vec{Q}}{m} \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \vec{N} - \vec{Q}.$$

Найдем силу реакции $\vec{N}$:

$$\vec{N} = \vec{Q} + m\vec{a}.$$

Но сила реакции опоры по модулю равна весу. Поэтому вес тела при его ускоренном движении по вертикали вверх равен:

$$\vec{P} = \vec{Q} + m\vec{a}.$$

● Таким образом, *при ускоренном движении тела по вертикали вверх его вес увеличивается на $m\vec{a}$.*

Увеличение веса тела, вызванное его ускоренным движением по вертикали вверх, называют *перегрузкой.* ●

Перегрузку испытывают, например, космонавты на активном участке движения ракеты. Для того, чтобы избежать вредных последствий перегрузок на организм, космонавты при старте располагаются в специальных креслах — ложементах. Ложементы уменьшают вредное влияние перегрузок на тело космонавта. Перегрузке подвергаются пассажиры лифта в начале его подъема, когда лифт движется с ускорением. Однако величина этой перегрузки и время ее проявления малы.

Большую перегрузку испытывает летчик, выводящий самолет из пикирования (рис. 79). В нижней части траектории самолет движется по дуге окружности с центростремительным ускорением $a = \dfrac{v^2}{R}$, направление которого противоположно ускорению свободного падения. Следовательно, в нижней точке траектории летчик давит на сиденье с силой:

$$\vec{P} = m\vec{g} + \frac{m\vec{v}^2}{R}.$$

**Невесомость.** Подвесим к неподвижному динамометру тело массой $m$. Прибор покажет вес тела $\vec{P}_0$ (рис. 80, *а*).

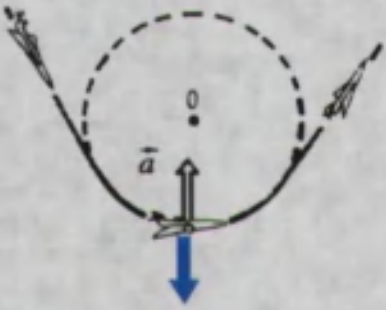


Рис. 79

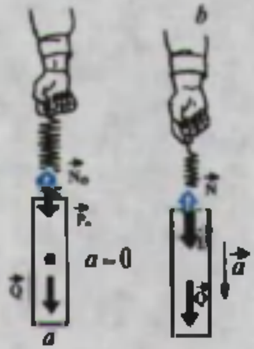


Рис. 80

Резко опустим динамометр вниз. Мы заметим, что пружина динамометра сжалась (рис. 80, *b*), что свидетельствует об уменьшении веса тела. Выясним, почему это произошло. Резко опустив тело, мы дали ему возможность двигаться ускоренно. В этом случае на него действуют сила тяжести $\vec{Q}$ и сила реакции деформированной пружины $\vec{N}$. По второму закону Ньютона равнодействующая этих сил и сообщает телу ускорение $\vec{a}$:

$$\vec{a} = \frac{\vec{Q} - \vec{N}}{m}.$$

Найдем вес тела. Нам известно, что $P = N$. Но из формулы второго закона Ньютона для случая равноускоренного движения тела вертикально вниз следует, что $m\vec{a} = \vec{Q} - \vec{N}$, откуда $\vec{N} = m\vec{g} - m\vec{a}$. Следовательно,

$$\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}.$$

● Таким образом, *при ускоренном движении тела по вертикали вниз его вес уменьшается на* $m\vec{a}$.

Допустим, что тело вместе с динамометром падает свободно (с ускорением *g*); тогда непосредственно из формулы $P = mg - ma$ следует, что вес тела будет равен нулю. В этом можно убедиться на опыте: при свободном падении груза и динамометра стрелка последнего стоит на нулевом делении, что свидетельствует о том, что пружина прибора не деформирована.

***Состояние тела, при котором отсутствует его взаимодействие с опорой, называют состоянием невесомости.***

Причина невесомости заключается в том, что в случае, когда действует только сила всемирного тяготения, она сообщает телу и его опорс одинаковые ускорения. Поэтому всякое тело, которое движется под действием только силы всемирного тяготения, находится в состоянии невесомости. В состоянии невесомости пребывают, например, космонавты и окружающие их предметы при орбитальных полетах космических кораблей. Наблюдая за ними с помощью телевидения, можно видеть, как в корабле "плавают" выпущенные космонавтами карандаши, блокноты и другис предметы.

В состоянии невесомости исчезает деформация тел, вызванная из-за взаимодействия с опорой. Например, пружина, лежащая на подставке (рис. 81, *a*) или висящая (рис. 81, *b*), всегда деформирована, а при свободном падении (рис. 81, *d*), она не деформирована. Поскольку все тела, находящиеся в состоянии невесомости, движутся с одинаковым ускорением, становятся хорошо заметными проявления сил молекулярного взаимодействия. Так, в кабине космического корабля капельки жидкости, не соприкасающиеся с другими телами, под действием сил молекулярного притяжения принимают форму шара. Жидкость, заполняющая в обычных условиях только часть сосуда, в кабине орбитального космического корабля растекается по стенкам сосуда (рис. 82).

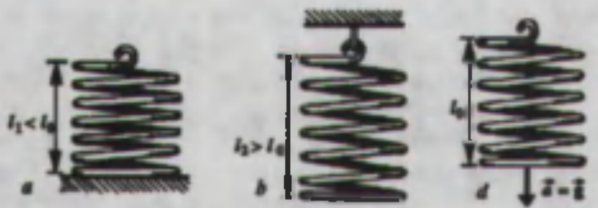


*Рис. 81*

*Рис. 82*

**3.* Пример решения задачи.**

Искусственную силу тяжести на космических кораблях — спутниках Земли можно создать, заставляя их вращаться. Одна из схем такого корабля приведена на рис. 83.

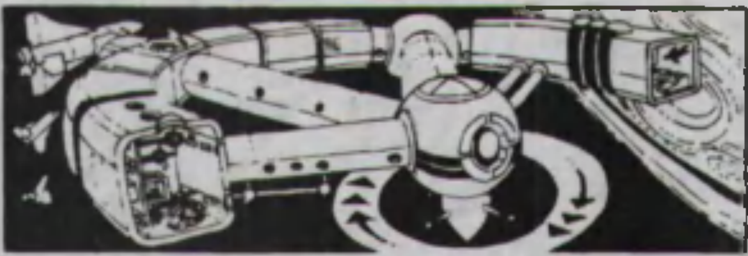


*Рис. 83*

Сколько оборотов в минуту должен совершать корабль, чтобы космонавты ощущали бы такую же силу тяжести, как и на поверхности Земли, если "пол" корабля-спутника находится на расстоянии 20 м от оси вращения?

**Анализ условия.** Свяжем систему отсчета с Землей и рассмотрим взаимодействие космонавта и космического корабля с точки зрения земного наблюдения.

Поскольку космонавт движется по окружности вокруг оси корабля, то на него действует центростремительная сила $\vec{F}_{цс} = \dfrac{m\vec{v}^2}{R}$, направленная по перпендикуляру к оси вращения. С этой силой на него действует "пол" корабля. Но по третьему закону Ньютона космонавт действует на "пол" корабля как на связь с противоположно направленной центробежной силой

$$\vec{F}_{цб} = \frac{m\vec{v}^2}{R}$$ (реакция связи $\vec{N} = \vec{F}_{цб}$).

Центробежная сила вызывает деформацию "пола", а центростремительная сила — деформацию тела человека, что воспринимается космонавтами как сила тяжести.

Взаимодействие космонавта с "полом" космического корабля аналогично взаимодействию человека с полом дома, расположенного на поверхности Земли, только действие и противодействие, причина и следствие как бы поменялись местами.

Из приведенного анализа мы еще раз убедились в том, что ощущение силы тяжести — результат взаимодействия тела человека с опорой.

**Решение.**

$mg = \frac{mv^2}{R}$, или $g = \frac{v^2}{R}$. Но $v = 2\pi R\nu$. Следовательно,

$g = \frac{4\pi^2 R^2 \nu^2}{R}$ или $g = 4\pi^2 R\nu^2$. Откуда $\nu = \sqrt{\frac{g}{4\pi^2 R}} =$

$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{R}}$.

Вычисления.

| | |
|---|---|
| $g = 9{,}8$ м/с$^2$<br>$R = 20$ м | $\nu = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14}\sqrt{\frac{9{,}8\ \text{м/с}^2}{20\ \text{м}}} = 0{,}11\ \frac{1}{\text{с}}$; |
| $\nu = ?$ | $\nu = 0{,}11\ \frac{1}{\text{с}} \cdot 60$ с/мин $= 6{,}6$ об/мин. |

**Ответ:** $\nu = 6{,}6$ об/мин.

**?**

**1.** Когда возникает перегрузка? Испытывали ли вы сами перегрузку? Когда?

**2.** Что такое невесомость и когда она возникает? Находились ли вы когда-либо в состоянии невесомости?

**3.** Реактивный самолет на одном из участков полета летел по вертикали вниз с ускорением $3g$. Испытывал ли летчик перегрузку или находился в состоянии невесомости?

## §34. ДВИЖЕНИЕ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

Изучая кинематику, вы узнали, что все тела, падая свободно, движутся равноускоренно с ускорением 9,8 м/с$^2$, а тела, брошенные вертикально вверх, движутся с тем же ускорением равнозамедленно. После изучения законов динамики и закона всемирного тяготения мы можем сказать, что причиной такого движения является взаимодействие всех тел с Землей, или, что одно и тоже, всемирное тяготение. Но тела на Земле движутся не только по вертикали. Познакомимся с другими видами движения под действием поля тяготения.

**1. Движение тела, брошенного горизонтально.** Допустим, что с башни высотой $h$ мы бросаем какое-либо тело с начальной скоростью $\vec{v}_0$, направленной горизонтально (перпендикулярно радиусу Земли). Сила трения тела о воздух столь мала, что ею можно пренебречь. В этом случае движение тела будет происходить только под действием силы тяжести.

Опыт показывает, что тело движется по кривой линии и через некоторое время падает на Землю (рис. 84).

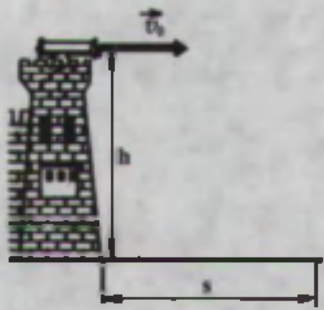


*Рис. 84*

Определим траекторию движения тела. Для этого нам надо найти зависимость расстояния $h$, проходимого телом по вертикали, от расстояния $s$, проходимого им по горизонтали (функцию $h$ от $s$).

Так как на тело не действуют никакие другие силы, кроме силы тяжести, направленной вертикально вниз, его движение по вертикали будет равноускоренным, а пройденное за какое-то время $t$ расстояние пропорционально квадрату времени:

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

В горизонтальном направлении тело движется по инерции с постоянной скоростью $\vec{v}_0$ и проходит за это же время $t$ расстояние $s = v_0 t$, откуда:

$$t = \frac{s}{v_0}.$$

Подставив найденное значение времени $t$ в формулу $h = \dfrac{gt^2}{2}$, получим:

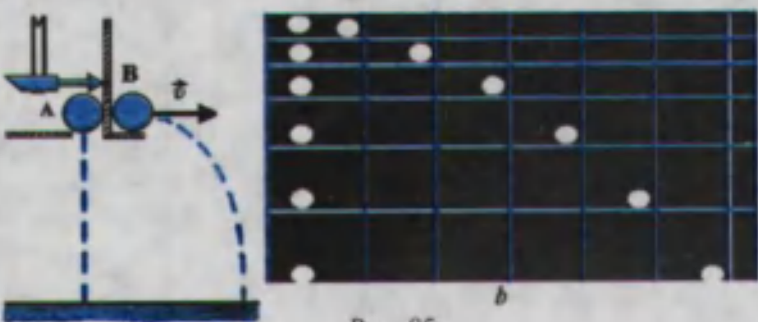
$$h = \frac{g}{2}\left(\frac{s}{v_0}\right)^2 = \frac{gs^2}{2v_0^2} = \frac{g}{2v_0^2}s^2.$$

Величина $g/2v_0^2$ постоянна. Обозначив ее буквой $k$, получим:

$$h = ks^2.$$

Из курса математики вы знаете, что зависимость вида $y = kx^2$ графически изображается параболой. Следовательно, *траектория движения тела, брошенного горизонтально, - это парабола, вершина которой находится в точке бросания.*

**2. Время движения тела, брошенного горизонтально.** Время движения тела, брошенного горизонтально с высоты $H$, равно времени свободного падения тела с этой высоты. Объясняется это тем, что в обоих случаях тело движется вниз с одинаковой высоты равноускоренно с одним и тем же ускорением $g$. В справедливости высказанного утверждения можно убедиться на многих опытах. Например, с помощью устройства, показанного на рис. 85, *а*, можно одновременно опустить шарик $A$ и толкнуть шарик $B$ в горизонтальном направлении. Шарики упадут на пол лаборатории одновременно: будет слышен только один удар о пол. Если падение этих шариков сфотографировать в тем-




*a* *b*

*Рис. 85*

ной комнате, освещая их через равные промежутки времени ярким светом, мы получим фотографию, изучение которой также показывает, что они падают одновременно (рис. 85, *b*).

### 3. Изучение движения тела, брошенного горизонтально.

*Лабораторная работа № 4*

Все сказанное выше о движении тела, брошенного горизонтально, вытекало из законов движения. Однако справедливость сказанного можно проверить экспериментально.

1. Возьмите прямоугольный лист фанеры и положите на него лист белой бумаги, а сверху нее – копировальную бумагу красящим слоем вниз, укрепите листы бумаги кнопками.

2. Соберите установку, показанную на рис. 86, добейтесь, чтобы загнутый конец лотка был расположен горизонтально.

3. Несколько раз (с разных высот лотка) отпустите шарик.

4. Разобрав установку, вы увидите, что шарик, скатываясь, оставил на белой бумаге следы своего движения (зарисовал траектории).

5. Нанесите на лист бумаги оси координат так, как показано на рис. 86.

6. Выберите произвольный масштаб времени и из-

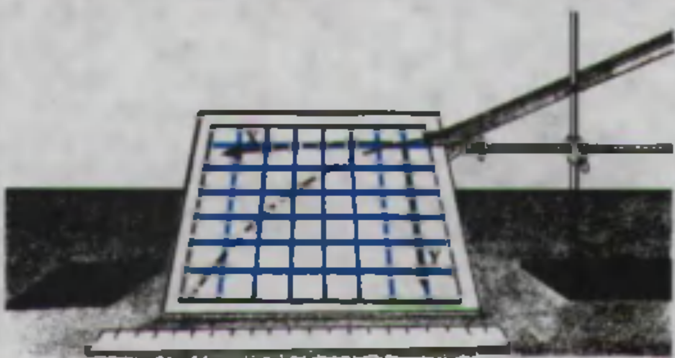


Рис. 86

мерьте перемещение шарика в вертикальном направлении за равные промежутки времени.

7. Убедитесь, что ускорение движения шарика по вертикали постоянно.

**?**

**1.** Объясните, как движется тело, брошенное горизонтально.

**2.** Докажите, что траектория движения тела, брошенного горизонтально, – парабола.

**3.** Как можно доказать экспериментально, что время движения тела, брошенного горизонтально с высоты $H$, равно времени свободного падения тела с этой высоты?

## §35. ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

В предыдушем параграфе вы узнали, что тело, брошенное горизонтально со скоростью $v$, двигаясь по параболе, пролетит в горизонтальном направлении расстояние $s = vt$. При этом предполагалось, что поверхность Земли горизонтальна. Такое предположение допустимо, пока скорость бросания мала. Посмотрим, что произойдет, если скорость бросания постепенно увеличивать.

**1. Искусственные спутники Земли.** Из формулы $s = vt$ видно, что чем больше скорость бросания, тем дальше от подножия башни упадет тело (см. рис. 84). Ньютон рассмотрел этот вопрос и доказал, что при некоторой скорости тело не упадет на Землю, а будет двигаться вокруг нее по окружности (рис. 87), став искусственным ее спутником. (Естественный спутник Земли – Луна). Это произойдет потому, что брошенное горизонтально тело будет падать на Землю, а Земля как бы будет на такое же расстояние уходить из-под тела.

*Рис. 87*

В результате тело будет двигаться на высоте $h$ от поверхности Земли.

**2. Первая космическая скорость.** Скорость, при которой тело, брошенное горизонтально, начинает двигаться по окружности вокруг Земли вблизи ее поверхности, называют *первой космической скоростью.*

Рассчитаем первую космическую скорость для спутника, обращающегося вокруг Земли по круговой орбите на небольшой высоте $h (h \ll R)$. В этом случае центростремительное ускорение спутника равно ускорению свободного падения: $a = g$. Но центростремительное ускорение равно $a = \frac{v^2}{R}$, где $R$ — радиус Земли, следовательно, $\frac{v^2}{R} = g$. Откуда $v = \sqrt{gR}$.

Подставив в эту формулу $g = 9{,}8$ м/с$^2$ и $R = 6{,}37 \cdot 10^6$ м, получим:

$$v = \sqrt{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 6{,}37 \cdot 10^6\ \text{м}} \approx 7{,}9 \cdot 10^3\ \text{м/с}.$$

Эту скорость необходимо сообщить спутнику перпендикулярно радиусу вращения.

Почти восемь километров в секунду — это около 29 тысяч километров в час! Сообщить такую скорость телу, конечно, непросто. Только в 1957 г. ученым и инженерам бывшего СССР впервые в истории человечества удалось с помощью мощной ракеты сообщить первую космическую скорость телу массой 83 кг. Это тело и стало первым искусственным спутником Земли.

Движение спутников вокруг Земли происходит под действием только одной силы — силы всемирного тяготения. Эта сила сообщает им и всем предметам, находящимся в них, одинаковые ускорения. Поэтому все тела в спутниках, в том числе и космонавты, находятся в состоянии невесомости (см. §33).

Рассчитаем первую космическую скорость для спутника массой $m$ на высоте $h$.

При движении спутника по окружности на высоте $h$ над поверхностью Земли его центростремительное ускорение равно:

$$a_h = \frac{v_h^2}{R+h}.$$

Это ускорение спутнику сообщает сила тяготения Земли:

$$F = G\frac{mM_з}{(R+h)^2}.$$

По второму закону Ньютона $a_h = \dfrac{F}{m} = \dfrac{GmM_з}{m(R+h)^2} =$

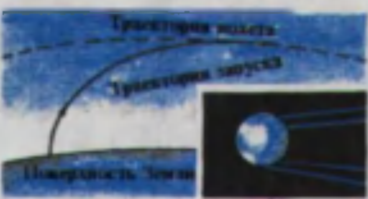
$= \dfrac{GM_з}{(R+h)^2}$, следовательно, $\dfrac{GM_з}{(R+h)^2} = \dfrac{v_h^2}{R+h}$, откуда

$v_h^2 = \dfrac{GM_з}{R+h}$ или: $v_h = \sqrt{\dfrac{GM_з}{R+h}}$.

Например, первая космическая скорость спутника, обращающегося по круговой орбите на высоте 300 км над поверхностью Земли, будет:

$$v_{300} = \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2 \cdot 5{,}98 \cdot 10^{24}\ \text{кг}}{637 \cdot 10^4\ \text{м} + 30 \cdot 10^4\ \text{м}}} = 7{,}73\ \text{км/с}.$$

**3. Как запускают искусственные спутники Земли?** Для того, чтобы запустить искусственный спутник Земли, его с помощью ракеты-носителя выводят в верхние слои атмосферы, а затем одновременно разгоняют до первой космической скорости и поднимают до расчетной высоты. При этом на расчетной высоте вектор скорости должен быть направлен



*a* *b*

*Рис. 88*

перпендикулярно радиусу окружности, по которой спутник должен обращаться. На рисунке 88 схематично показана траектория запуска искусственного спутника Земли и копия первого искусственного спутника Земли.

?

1. Почему искусственный спутник не падает на Землю?
2. Рассчитайте космическую скорость для спутника, обращающегося вокруг Земли на небольшой высоте.
3. Ракете сообщили скорость 8 км/с, направленную вертикально вверх. Станет ли она искусственным спутником Земли?

### *Упражнение 7*

**1.** Найдите силу притяжения между Землей и Луной. (Ответ: $F = 2 \cdot 10^{20}$ Н).

**2.** Автомобиль массой 10 т движется со скорость 54 км/ч по выпуклому мосту, радиус кривизны которого 50 м. Определите силу давления автомобиля на мост, когда он проходит в середине моста. (Ответ: $N = 5{,}3 \cdot 10^4$ Н).

**3.** Решите предыдущую задачу для вогнутого моста. (Ответ: $N = 1{,}43 \cdot 10^5$ Н).

**4.** Определите вес тела массой 1 кг на экваторе.

**5.** Изменится ли вес тела, если оно будет двигаться с ускорением в горизонтальном направлении?

**6.** На какой высоте должен находиться искусственный спутник Земли, чтобы период его обращения был равен 24 ч? (Ответ: $H = 3{,}6 \cdot 10^4$ м).

**7.** Был ли в состоянии невесомости космонавт А. Леонов: а) в кабине космического корабля при полете по орбите; б) при выходе из корабля в открытый космос?

**8.** Определите период обращения спутника Земли, если он движется по круговой орбите на расстоянии 200 км от поверхности Земли. (Ответ: $T = 5200$ с).

**9.** Искусственный спутник Земли обращается по круговой орбите на высоте 390 км. Определите период его обращения. (Ответ: $T = 5500$ с).

**10.** Геофизическая ракета была запущена вертикально вверх и достигла высоты 500 км. Какая начальная скорость была ей сообщена? Среднее ускорение силы тяжести на участке подъема считать равным 9,1 м/с$^2$. (Сопротивление воздуха не учитывать). Ответ: $v_0 = 3$ км/с).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ VII

**1.** Между всеми телами существует взаимное притяжение. Сила взаимного притяжения тел определяется законом всемирного тяготения, открытым Ньютоном в 1667 г. Взаимное притяжение тел осуществляется через их гравитационные поля.

**2.** Закон всемирного тяготения гласит: два тела (рассматриваемые как материальные точки) притягиваются друг к другу по прямой, их соединяющей, с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, т.е.

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

где $G$ - гравитационная постоянная.

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

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

**4.** Векторную разность между силой притяжения тела к Земле и центростремительной силой, вызванной вращением тела вокруг земной оси, называют силой тяжести. Она приложена к центру масс тела и может быть подсчитана по формуле: $Q = mg$.

**5.** Силу тяжести следует отличать от веса. Весом называют силу, с которой тело, вследствие его притяжения к Земли, действует на опору или подвес; вес приложен к опоре. Вес зависит от ускорения, с которым тело движется, и может быть определен по формуле:

$$P = m(g \pm a).$$

При свободном падении тела ($a = g$) наступает состояние невесомости (вес равен нулю), а при ускоренном движении по вертикали вверх — состояние перегрузки.

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

# ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Законы Ньютона позволяют решить в принципе все задачи, связанные с взаимодействием тел. Однако часто нахождение сил взаимодействия представляет значительные трудности, а без знания сил нельзя найти ускорений, приобретаемых телами, а следовательно, их скоростей и перемещений. Например, с помощью законов Ньютона можно, но трудно определить силу взаимодействия ракеты и вытекающих из нее газов, силу взаимодействия тел при столкновении и т.п. Для решения подобных задач в механике введены специальные понятия и величины, и с помощью законов Ньютона установлены соотношения между ними. При этом оказалось, что численные значения вновь введенных величин не изменяются в процессе взаимодействия тел. (Примером такой сохраняющейся величины является ранее введенная масса тел). Поэтому важнейшие соотношения между сохраняющимися величинами получили название *законов сохранения*.

Хотя законы сохранения мы получим с помощью законов Ньютона, они не являются следствиями законов Ньютона. Законы сохранения, как и законы Ньютона, - результат теоретического обобщения опытных фактов. Законы сохранения — фундаментальные законы физики. Они имеют исключительно большое значение, так как применимы не только в механике, но и в других разделах физики.

# Глава VIII. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

## §36. ИМПУЛЬС

Слово "импульс" происходит от латинского слова impulsus, что в буквально переводе означает "толчок". В механике этим термином обозначают две величины: импульс силы и импульс тела.

**1. Импульс силы.** Результат взаимодействия тел зависит не только от силы, но и от времени их взаимодействия. В этом можно убедиться на следующих опытах.

На горизонтальное стекло положим стальной шарик. Быстро пронеся над ним сильный магнит, мы заметим, что шарик лишь едва сдвинулся с места (рис. 89, *a*). Повторим опыт, пронеся магнит над шариком медленно. В этом случае шарик придет в движение и будет двигаться вслед за магнитом (рис. 89. *b*).

Эксперимент свидетельствует о том, что результаты взаимодействия зависят от времени взаимодействия.

На лист бумаги, лежащий на краю стола, поставим стакан с водой. Если медленно тянуть бумагу, то стакан сдвинется с места и будет перемещаться вместе с ней (рис. 90, *a*). Если же лист дернуть резко, он выдернется из-под стакана, а стакан останется на прежнем месте (рис. 90, *b*).

Проделанные опыты свидетельствуют о том, что результат взаимодействия тел зависит не только от силы, но и от времени ее действия. Поэтому в физике

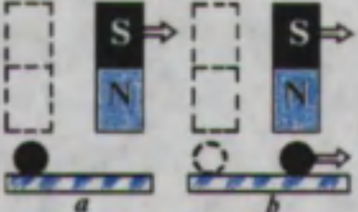



*Рис. 89*


*Рис. 90*

для характеристики действия силы ввели специальную величину — импульс силы.

***Импульсом силы называют векторную физическую величину, являющуюся мерой действия силы за некоторый промежуток времени.***

***Импульс силы измеряется произведением силы на время ее действия:***

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

где $\vec{I}$ — импульс силы $\vec{F}$ за время $t$.

Направление вектора импульса силы совпадает с направлением силы.

За единицу импульса силы в Международной системе единиц принят импульс силы в 1 Н, действующей в течение 1 с (ньютон-секунда):

$$[I] = 1\ \text{Н} \cdot \text{с}.$$

**2. Импульс тела или количество движения.** Допустим, что по наклонной эстакаде скользит мешок с хлопком массой 2 кг (рис. 91) со скоростью 5 м/с. Внизу эстакады мешок легко можно остановить руками. Но если по эстакаде с такой же скоростью скользит мешок с песком массой 50 кг, его руками остановить нельзя. Пуля массой 9 г, движущаяся со скоростью 5 м/с, может быть остановлена тонкой тканью или листом картона, а ту же пулю, но выпущенную из винтовки со скоростью 800 м/с, нельзя остановить даже с помощью трех толстых досок.

*Рис. 91*

Приведенные примеры говорят о том, что для характеристики движения тела недостаточно знать только его массу или скорость. Поэтому в качестве одной из мер механического движения введена специальная величина — *импульс тела* (или количество движения).

***Импульсом тела называют векторную физическую величину, являющуюся мерой механического движения.***

***Импульс тела измеряется произведением массы тела на скорость его движения:***

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

где $\vec{p}$ — импульс тела с массой $m$, движущегося со скоростью $\vec{v}$.

За единицу импульса тела в Международной системе единиц принят импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с (к и л о г р а м м - м е т р в с е к у н д у):

$$[p] = 1\ кг \cdot 1\ м/с = 1\ кг \cdot м/с.$$

**3. Соотношение между импульсом силы и импульсом тела.** Допустим, что тело массой m двигалось со скоростью $\vec{v}_0$. Затем это тело в течение времени $t$ взаимодействовало с другим телом с силой $\vec{F}$. В процессе этого взаимодействия тело двигалось с ускорением:

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

где $\vec{v}$ — скорость тела в конце взаимодействия.

Но по второму закону Ньютона $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$. Следовательно, $\dfrac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \dfrac{\vec{F}}{m}$ или $\boxed{\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0}$

В полученной формуле:

$\vec{F}t$ — импульс силы;

$m\vec{v}_0$ — импульс тела до взаимодействия;

$m\vec{v}$ — импульс тела после взаимодействия;

$m\vec{v} - m\vec{v}_0$ — изменение импульса тела в результате взаимодействия.

*Таким образом, изменение импульса тела равно импульсу силы взаимодействия.*

?

**1.** Что называют импульсом силы? В каких единицах он измеряется?

**2.** Что называют импульсом тела?

**3.** Каково соотношение между импульсом силы и импульсом тела?

**4.** Найдите импульс тела массой 10 кг, движущегося со скоростью 5 м/с.

## §37. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Допустим, что изолированная система состоит из двух взаимодействующих тел массами $m$ и $M$, которые в начальный момент в выбранной инерциальной системе отсчета имели соответственно скорости $\vec{v}_0$ и $\vec{u}_0$. Через некоторый промежуток времени $t$ их скорость в результате взаимодействия изменилась до $\vec{v}$ и $\vec{u}$.

По третьему закону Ньютона тела взаимодействуют с силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

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

Выразим эти силы по второму закону Ньютона, записанному через импульсы:

$$\vec{F}_1 = m\vec{a}_1 = m\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}; \quad \vec{F}_2 = M\vec{a}_2 = M\frac{\vec{u} - \vec{u}_0}{t}.$$

Так как $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, то $\dfrac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t} = -\dfrac{M\vec{u} - M\vec{u}_0}{t}$, или

$m\vec{v} - m\vec{v}_0 = M\vec{u}_0 - M\vec{u}$. Перенеся импульсы тел до взаимодействия в одну сторону равенства, а после взаимодействия - в другую, получим:

$$\boxed{m\vec{v}_0 + M\vec{u}_0 = m\vec{v} + M\vec{u}.}$$

*Из полученного выражения видно, что векторная сумма импульсов тел, входящих в замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.*

Это и есть *закон сохранения импульса.*

Мы пришли к закону сохранения импульса, применив к взаимодействию тел второй и третий законы Ньютона. Однако закон сохранения импульса не является следствием законов Ньютона. Это фундаментальный, самостоятельный закон природы, не знающий никаких исключений. Этот закон абсолютно точно соблюдается и в макромире, и в микромире. Справедливость этого закона подтверждена всей практикой человечества.

**Пример, поясняющий закон сохранения импульса.** 1) Допустим, что по гладкому горизонтальному столу под углом друг к другу движутся два стальных шара, массы которых $m$ и $M$ (рис. 92).

Пусть в момент взаимодействия (удара) они в выбранной инерциональной системе отсчета имели импульсы $m\vec{v}_0$ и $M\vec{u}_0$, а после удара их импульсы соответственно стали $m\vec{v}$ и $M\vec{u}$.

Так как силы трения малы, а силы тяжести уравновешены силами реакции опоры, то систему можно рассматривать как изолированную.

По третьему закону Ньютона силы взаимодействия шаров равны по модулю и противоположны по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Выразим эти силы по третьему закону Ньютона, записанному через импульсы:

*Рис. 92*

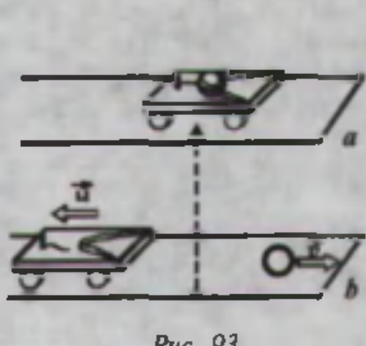


*Рис. 93*

$\vec{F_1}t = m\vec{v} - m\vec{v_0}$; $\vec{F_2}t = M\vec{u} + M\vec{u_0}$, так как $\vec{F_1} = -\vec{F_2}$, то и $\vec{F_1}t = -\vec{F_2}t$. Поэтому

$$m\vec{v} - m\vec{v_0} = -M\vec{u} + M\vec{u_0}.$$

Перенесем импульсы тел до взаимодействия в одну сторону равенства, а после взаимодействия — в другую:

$$\boxed{m\vec{v_0} + M\vec{u_0} = m\vec{v} + M\vec{u}.}$$

Полученное выражение говорит о том, что при взаимодействии тел, входящих в изолированную систему, геометрическая сумма импульсов не изменилась.

2) Допустим, что на легкоподвижной тележке находится шар и растянутая резиновая лента (рис. 93, *a*). Лента удерживается в натянутом состоянии прочной нитью. Поднесем к нити горящую спичку: она рвется, а лента сбрасывает шар с платформы. При этом, как показывает опыт, платформа начинает двигаться в сторону, противоположную движению шара (рис. 93, *b*). И в этом случае тележку и шар можно рассматривать как изолированную систему, так как влияние на них других тел в ходе опыта не проявляется: силы трения малы, а силы тяжести уравновешены силами реакции опор.

До опыта суммарный импульс замкнутой системы "платформа — шар" был равен нулю. Вычислим ее импульс в тот момент, когда шар покинул платформу. Обозначим импульс платформы относительно лабораторной системы отсчета в этот момент через $M\vec{u}$, а импульс шара — через $m\vec{v}$. Так как эти тела вначале находились в покое относительно системы отсчета, связанной с лабораторией, то по второму закону Ньютона полученные ими импульсы равны:

$$\vec{F_1}t = M\vec{u} \text{ и } \vec{F_2}t = m\vec{v}, \text{ откуда } \vec{F_1} = \frac{M\vec{u}}{t} \text{ и } \vec{F_2} = \frac{m\vec{v}}{t}.$$

Но по третьему закону Ньютона $\vec{F_1} = -\vec{F_2}$. Следовательно,

$$\frac{M\vec{u}}{t} = -\frac{m\vec{v}}{t}.$$

Исключив время и перенеся все члены в одну сторону равенства, получим:

$$\boxed{M\vec{u} + m\vec{v} = 0,}$$

т.е. суммарный импульс системы после опыта не изменился и по-прежнему равен нулю.

**?**

1. Какую систему тел называют изолированной?
2. Сформулируйте закон сохранения импульса.
3. Приведите примеры, иллюстрирующие справедливость закона сохранения импульса.
4. На тело массой 2 кг в течение 2 с действовала сила 2 Н. Найдите импульс силы и изменение импульса тела. (Ответ: $I = 4$ Н · с; $\Delta p = 4$ кг · м/с).

***Примеры решения задач.** Используя закон сохранения импульса, можно достаточно просто решить многие задачи, решение которых с помощью законов Ньютона невозможно или сложно.

**1.** Мальчик, стоящий в лодке, бросает кусок глины по направлению к корме лодки, где установлен щит (рис. 94). Проанализируйте процесс бросания глины с точки зрения закона сохранения импульса.

**Анализ условия.** Силы тяжести лодки и мальчика уравновешены выталкивающей силой воды, а трение лодки о воду, зависящее от скорости движения лодки, в рассматриваемом случае пренебрежимо мало. Поэтому система тел (мальчик – лодка – кусок глины) может быть принята за изолированную (замкнутую) систему.

**Решение.** Рассмотрим последовательно процесс бросания.

а) До взмаха руки с куском глины замкнутая система тел, рас-

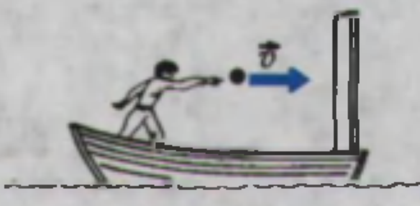


*Рис. 94*

сматриваемых в задаче, покоилась относительно системы отсчета, связанной с Землей, и ее суммарный импульс был равен нулю: $\vec{p} = 0$.

б) В момент броска кусок глины приобрел импульс $\vec{p}_1 = m\vec{v}$, где $m$ — его масса, а $\vec{v}$ — скорость относительно берега (и воды). *По закону сохранения* импульса лодка с мальчиком получила равный по модулю, но противоположно направленный импульс $\vec{p} = -M\vec{u}$, где $M$ — масса лодки с мальчиком, $\vec{u}$ — их скорость относительно берега. По закону сохранения импульса $m\vec{v} = -M\vec{u}$, откуда $m\vec{v} + M\vec{u} = 0$. Значит, после броска суммарный импульс системы остается равным нулю.

в) После удара кусок глины передаст стенке импульс $m\vec{v}$, который по закону сохранения импульса равен импульсу лодки $M\vec{u}$, и лодка остановится.

Результат решения задачи интересен (и его надо запомнить): он показывает, что действие внутренних сил не может изменить движение системы.

**2.** Железнодорожный вагон массой 60000 кг движется по прямолинейному участку пути со скоростью 1 м/с. Какова будет скорость этого вагона после сцепки с неподвижным вагоном массой 40 000 кг? (Трение не учитывать).

**Анализ условия.** Для решения задачи существенно важно, что трение можно не учитывать: это позволяет нам рассматривать систему вагонов как изолированную и применить к сцепке вагонов закон сохранения импульса.

**Решение.** Обозначим массы вагонов через $m_1$ и $m_2$, скорость первого вагона до сцепки через $\vec{v}_1$, скорость второго вагон $\vec{v}_2$ ($v_2 = 0$), а скорость вагонов после сцепки через $\vec{u}$. По закону сохранения импульса $m_1\vec{v} = m_1\vec{u} + m_2\vec{u}$. Направив ось $OX$ вдоль железнодорожного пути по направлению движения первого вагона, закон сохранения импульса можно записать через проекции скоростей: $m_1 v_x = m_1 u_x + m_2 u_x$, но $v_x = v$, а $u_x = u$[1]. Поэтому $m_1 v = m_1 u + m_2 u$,

откуда $u = \dfrac{m_1 v}{m_1 + m_2}$.

**Вычисления.**

| Дано | Решение |
|---|---|
| $m_1 = 60\,000$ кг<br>$m_2 = 40\,000$ кг<br>$v_1 = 1$ м/с<br>$v_2 = 0$ | $u = \dfrac{60\,000 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}}{100\,000 \text{ кг}} = 0{,}6$ м/с. |
| $u = ?$ | **Ответ:** $u = 0{,}6$ м/с. |

**3.** Мальчик массой $m = 50$ кг бежит со скоростью $v = 5$ м/с за легкоподвижной тележкой массой $M = 100$ кг и вскакивает на нее. С какой скоростью станет двигаться тележка после того, как мальчик вскочит на тележку, если до этого тележка двигалась со скоростью $u_0 = 2$ м/с.

**Анализ условия**. Указание на легкую подвижность тележки дает нам основание предположить, что силы трения малы и их можно не учитывать. Силы тяжести тележки и мальчика уравновешены силами реакции опор. Поэтому систему "тележка – мальчик" в момент взаимодействия можно рассматривать как изолированную. Систему отсчета свяжем с Землей, а направление оси *OX* совпадает с направлением движения платформы.

**Решение.** Так как движение происходит вдоль оси *OX*, то проекции импульсов и скоростей будут равны их модулям: $v_x = v$; $u_{0x} = u_0$; $u_x = u$. Поэтому можно записывать математические соотношения в скалярной форме.

Начальные импульсы тележки и мальчика соответственно равны $Mu_0$ и $mv$. Начальный импульс системы

---

[1] В дальнейшем всюду проекции скоростей на траекторию будем обозначать через модули, опуская формальный переход $v_x = v$; $u_x = u$.

"тележка – мальчик" равен: $p_0 = Mu + mv$. После того как мальчик прыгнет и остановится на тележке, импульс системы "тележка – мальчик" можно выразить так:

$$p = (M + m)\,u.$$

По закону сохранения импульса $p = p_0$ или $(M + m)\,u = Mu_0 + mv$. Отсюда скорость тележки равна:

$$u = \frac{Mu_0 + mv}{M + m}.$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $m = 50$ кг <br> $M = 100$ кг <br> $v = 5$ м/с <br> $u_0 = 2$ м/с | $u = \dfrac{100\ \text{кг} \cdot 2\ \text{м/с} + 50\ \text{кг} \cdot 5\ \text{м/с}}{100\ \text{кг} + 50\ \text{кг}} = 3\ \text{м/с}.$ |
| $u = ?$ | **Ответ:** $u = 3$ м/с. |

**4.** Мальчик массой $m$, бегущий со скоростью $v$, догоняет легкоподвижную платформу массой $M$, движущуюся по горизонтальному пути со скоростью $u_0$. Вскочив на платформу, мальчик повернулся и соскочил с платформы со скоростью $v$ в сторону, противоположную ее движению (рис. 95). Определите импульс, переданный мальчиком платформе, и скорость движения платформы после того, как мальчик с нее спрыгнул.

**Анализ условия.** Указание на легкую подвижность платформы дает нам основание считать, что силы трения настолько малы, что их можно не учитывать. Так как мальчик и платформа движутся по горизонтальному пути, их силы тяжести уравновешиваются силами

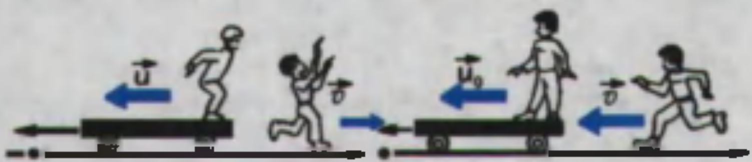



*Рис. 95*

реакции. Поэтому систему тел "платформа — мальчик" можно принять за изолированную.

**Решение.** Так как система "платформа — мальчик" изолированная, то в процессе явлений, описанных в задаче, ее импульс остается неизменным. Систему отсчета свяжем с Землей, а ось $OX$ направим в сторону движения платформы.

Рассмотрим каждую стадию прохождения явлений, описанных в задаче, с точки зрения закона сохранения импульса.

а) В начальный момент импульсы платформы и мальчика соответственно были $Mu_0$ и $mv$, а импульс системы "платформа — мальчик": $p = Mu_0 + mv$.

б) После прыжка мальчика на платформу мальчик и платформа стали двигаться как одно целое. Но по закону сохранения импульса импульс системы "платформа — мальчик" не изменился и остался прежним.

в) После прыжка мальчика с платформы импульс системы перераспределился между мальчиком и платформой. Импульс мальчика стал $-mv$, а импульс платформы $Mu$. Сумма же импульсов по закону сохранения импульса не изменилась:

$$Mu + (-mv) = Mu_0 + mv.$$

Из этого равенства найдем импульс платформы $Mu = Mu_0 + 2mv$ и ее скорость

$$u = \frac{Mu_0 + 2mv}{M}.$$

Таким образом, мальчик передал платформе импульс $p = 2mv$, а скорость платформы увеличилась на $\Delta u$:

$$\Delta u = u - u_0 = \frac{Mu_0 + 2mv}{M} - u_0 = \frac{Mu_0 + 2mv - Mu_0}{M} =$$

$$= \frac{2mv}{M}; \ \Delta u = \frac{2mv}{M}.$$

## §38. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

**1. Понятие о реактивном движении.** Представим себе тихое, спокойное озеро, на поверхности которого покоится лодка, нагруженная одинаковыми камнями. На груде камней стоит человек (рис. 96). Лодку, человека и камни можно рассматривать как замкнутую систему тел, так как их взаимодействие с окружающей средой (водой и воздухом) несущественно: трение мало, а силы тяжести уравновешены.

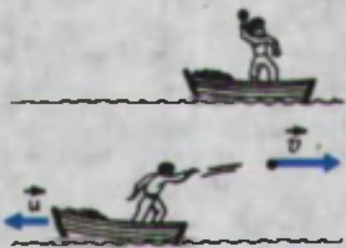


*Рис. 96*

Рассмотрим, что произойдет, если человек начнет бросать камни один за другим в горизонтальном направлении через одинаковые интервалы времени с одинаковой, относительно лодки, скоростью $\vec{v}$.

Бросив первый камень массой $m$, человек сообщит ему импульс $m\vec{v}$. По закону сохранения импульса лодка, человек и оставшиеся в лодке камни приобретут равный по модулю, но противоположно направленный импульс $-m\vec{v} = (M - m)\vec{u}_1$, где $(M - m)$ — масса лодки с человеком и оставшимися камнями, а $\vec{u}_1$ — скорость лодки относительно берега.

Из этого равенства определим скорость лодки относительно берега:

$$\vec{u}_1 = -\frac{m\vec{v}}{M - m} = -\frac{m}{M - m}\vec{v}.$$

Из полученной формулы видно, что скорость движения лодки будет тем больше, чем больше отношение массы брошенного камня к массе лодки и чем больше скорость камня.

После броска второго камня скорость лодки относительно берега увеличится на $\Delta\vec{u}_2$. Будем считать, что лодка движется без трения. Тогда после второго броска скорость ее движения относительно озера станет равной: $\vec{u}_1 + \Delta\vec{u}_2$.

После броска третьего камня скорость лодки увеличится на $\Delta\vec{u}_3$, а результирующая скорость лодки относительно берега будет $\vec{u}_1 + \Delta\vec{u}_2 + \Delta\vec{u}_3$.

В рассмотренном примере мы познакомились с движением, возникающим при отталкивании тел замкнутой системы друг от друга. Такое движение называют *реактивным*.

**2. Примеры реактивного движения.** Реактивное движение мы часто наблюдаем в повседневной жизни.

Для уменьшения шума на водопроводный кран иногда надевают резиновую трубку. При пуске воды трубка отклоняется в сторону, противоположную струе вытекающей воды.

Ствол дальнеструйного дождевого аппарата, применяемого для полива небольших полей, непрерывно вращается вокруг вертикальной оси (рис. 97, *a*, *b*). Это достигается благодаря незначительному изгибу конца ствола в горизонтальной плоскости. Струя воды, вытекая из него, создает реактивную силу, которая и вращает ствол.

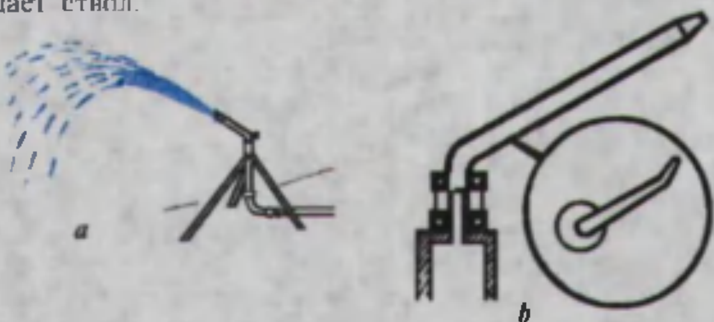


*Рис. 97*

Каждый слышал слово "ракета" и знает, что ракеты используют для изучения околоземного пространства и Солнечной системы. Ракета состоит из корпуса и вещества, которое выбрасывается из корпуса (рис. 98).

Пронаблюдаем полет модели ракеты. Накачаем в нее воздух, установим на пусковом приспособлении (рис. 99)

*Рис. 98*

*Рис. 99*

и откроем клапан. (Для упрощения расчетов будем считать, что весь воздух из ракеты вытек моментально). Сжатый воздух, вытекая из ракеты, получает импульс $\vec{p}_1 = -m\vec{v}$, где $m$ — масса воздуха, а $\vec{v}$ - скорость его вытекания. Ракета приобретает равный по модулю, но противоположно направленный импульс $\vec{p}_2 = -M\vec{u}$, где $M$ и $\vec{u}$ — соответственно ее масса и скорость. Скорость ракеты равна:

$$\vec{u} = -\frac{m}{M}\vec{v}.$$

В результате ракета чуть-чуть приподнимется и упадет набок. Она не летит. Это объясняется, вероятно, тем, что отношение массы вышедшего из ракеты воздуха к ее массе мало, а потому и скорость, получаемая ракетой, невелика.

Для проверки сделанного предположения нальем в ракету столько воды, чтобы она заняла примерно половину ее объема, и вновь с помощью насоса накачаем в ракету воздух.

Повторив опыт (который надо делать на открытом пространстве), мы увидим, что ракета стремительно поднимается высоко вверх, а затем под действием силы тяжести падает на Землю.

Опыт подтвердил наше предположение: чем больше отношение массы тел, выбрасываемых из ракеты, к ее собственной массе (вместе со всем содержимым), тем больше скорость последней.

Формула $\vec{u} = -\dfrac{m}{M}\vec{v}$ подсказывает и второй путь увеличения скорости ракеты: надо увеличить скорость $\vec{v}$ выброса массы $m$.

Чтобы проверить это предположение, повторим предыдущий опыт, но накачаем в ракету воздух до более высокого давления, что обеспечит большую скорость вытекания из нее воды. В этом случае ракета поднимается значительно выше, что и подтверждает правильность сделанного нами предположения.

В наших опытах мы пользовались водой и сжатым воздухом. В ракетах, используемых в технике, для получения реактивного движения сжигают специальные виды топлива, при сгорании которого образовавшиеся газы покидают ракету с большой скоростью.

Ракеты используются для запуска космических кораблей и для управления их полетом в космосе.

Принцип реактивного движения встречается и в природе, например, при передвижении некоторых насекомых и животных.

?

1. Приведите примеры реактивного движения.
2. На примере лодки, с которой сбрасывают камни (см. рис. 96), объясните принцип реактивного движения.
3. От каких величин зависит скорость ракеты?
4. Определите скорость лодки $\vec{u}_2$ после броска второго камня в примере, рассмотренном в п. 1 этого параграфа.

(Ответ: $\vec{u}_2 = -\dfrac{2m\vec{v}}{M - 2m}$).

## §39. УСТРОЙСТВО И ДВИЖЕНИЕ РАКЕТЫ

Современная ракета — это весьма сложное сооружение, в котором можно выделить следующие основные части: оболочку ракеты, топливные баки, реактивные двигатели, контейнер для полезной нагрузки и аппаратуру управления. Реактивные двигатели, устанавливаемые на ракетах, принято называть *ракетными двигателями*.

**1. Ракетный двигатель.** В настоящее время широко используют термохимические ракетные двигатели, в которых при сжигании топлива образуются сильно

*Рис. 100*

нагретые и сжатые газы, истекающие затем наружу. Таким образом, скрытая в топливе внутренняя энергия превращается в двигателях в кинетическую энергию истекающих продуктов сгорания.

В зависимости от агрегатного состояния применяемого топлива термохимические ракетные двигатели подразделяются на *жидкостные ракетные двигатели* (ЖРД) и *ракетные двигатели твердого топлива* (РДТТ).

В ЖРД преимущественно применяют топливо, состоящее из двух компонентов: горючего (например, керосин, гидразин, жидкий водород) и окислителя (например, жидкий кислород).

На рис. 100 изображена принципиальная схема ЖРД с турбонасосной системой подачи горючего и окислителя в камеру сгорания, где происходит их разбрызгивание, смешение и горение. При интенсивном горении топлива в ограниченном объеме камеры образуются газы с температурами порядка 3000 – 5000°С и большими давлениями. На рис. 101 показано примерное размещение основных блоков в корпусе ракеты.

*Рис. 101*

Большой перепад давлений внутри камеры сгорания и снаружи порождает мощное течение газов через раструб особой формы – сопло, где газы ускоряются до больших скоростей.

**2. Многоступенчатые ракеты.** При движении ракеты масса ее корпуса пассивна. В основном, это масса баков для горючего. Баки становятся ненужным балластом, но для сообщения им ускорения надо расходовать топливо. Идеальной была бы такая ракета, корпус которой был бы сделан из топлива. Но этого, по-видимому, пока сделать нельзя. Поэтому по мере израсходования топлива необходимо сбрасывать те конструкции, которые больше уже не нужны. Учитывая это, ракеты делают составными, состоящими из нескольких ступеней.

Наиболее массивную часть ракеты, предназначенную для старта и разгона всей ракеты, называют *первой ступенью.* (Ступени ракеты принято считать в порядке их отделения при выводе полезного груза на орбиту).

Когда первая массивная ступень многоступенчатой ракеты исчерпает при разгоне все запасы топлива, она отделяется.

Дальнейший разгон продолжает *вторая*, менее массивная *ступень*, и к ранее достигнутой при помощи первой ступени скорости она добавляет еще некоторую скорость, а затем отделяется. *Третья ступень* продолжает наращивание скорости до необходимого значения и доставляет полезный груз на орбиту.

?

1. Объясните, как устроен ЖРД.
2. Почему ракеты делают многоступенчатыми?
3. Чем вызвано использование ракет для космических полетов?

***Упражнение 8***

**1.** На тело в течение 10 с действует сила 5 Н. Найдите изменение импульса тела.

**2.** Человек массой 60 кг, бегущий со скоростью 10 м/с, догоняет тележку массой 40 кг, движущуюся со скоростью 1 м/с, и вскакивает на нее. С какой скоростью станет двигаться тележка после этого? (Ответ: $v$ = 6,4 м/с).

**3.** При формировании железнодорожного состава три сцепленных между собой вагона, движущиеся со скоростью 2 м/с, сталкиваются с неподвижным вагоном, после чего все вагоны продолжают двигаться в ту же сторону. Определите скорость вагонов, если их массы одинаковы. (Ответ: $v$ = 1,5 м/с).

**4.** Зенитный снаряд, выпущенный вертикально вверх, достигнув максимальной высоты, взорвался. При этом образовалось три осколка массой 10, 20 и 30 кг. Первые два осколка разлетелись под углом 120° к траектории полета со скоростями 100 и 300 м/с. С какой скоростью и в каком направлении начал движение третий осколок? (Ответ: $v$ = 93 м/с).

**5.** На поверхности озера плавает плот массой 300 кг, на одном конце которого стоит человек массой 60 кг. На какое расстояние переместится плот, если человек пройдет по нему 5 м? (Ответ: $l_1$ = 1 м).

**6.** Тело массой 2 кг свободно падает с высоты 20 м. Найдите изменение импульса тела за время падения. Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с$^2$. (Ответ: $\Delta p$ = 40 кг · м/с).

**7.** Молекула массой $5 \cdot 10^{-26}$ кг летит со скоростью 500 м/с и ударяется о стенку сосуда под углом 30° и отскакивает от нее под таким же углом и с той же по модулю скоростью. Найдите импульс силы, полученный стенкой при ударе. (Ответ: $I = 2{,}5 \cdot 10^{-23}$ Н · с).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ VIII

**1.** Импульсом тела (или количеством движения) называют векторную физическую величину, являющуюся мерой механического движения. Импульс тела равен произведению его массы на скорость движения: $\vec{p} = m\vec{v}$.

Направление импульса тела совпадает с направлением скорости его движения.

За единицу импульса тела в Международной системе единиц принят импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с: $[p] = 1\ \dfrac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

**2.** Замкнутой (или изолированной) системой тел называют систему тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в эту систему.

**3.** Векторная сумма импульсов тел замкнутой системы остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

**4.** Импульсом силы называют векторную физическую величину, являющуюся мерой действия силы за некоторый промежуток времени. Импульс силы равен произведению силы на время ее действия. Направление импульса силы совпадает с направлением силы $\vec{I} = \vec{F}t$. За единицу импульса силы в Международной системе единиц принят импульс силы в 1 Н, действующей в течение 1 с: $[I] = 1$ Н · с.

**5.** Изменение импульса тела равно импульсу силы: $\Delta\vec{p} = \vec{I}$.

**6.** Реактивным называют движение, возникающее при взаимном отталкивании тел замкнутой системы. Приращение скорости тела массой $M$, от которого со скоростью $\vec{v}$ отделилось тело массой $m$, может быть найдено по формуле:

$$\Delta\vec{u} = -\frac{m}{M - m}\vec{v}.$$

## Глава IX. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ЗАКОН ПРЕВРАЩЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Все в окружающем нас мире находится в вечном движении, в вечном взаимодействии. Самым простым видом движения является механическое. При определенных условиях механическое движение превращается в другие виды движения.

Например, если толкнуть брусок вдоль поверхности стола, то он придет в движение, но вскоре оста-

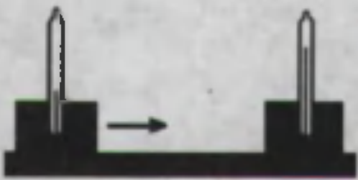


Рис. 102

новится: его механическое движение прекратится. Однако вмонтированный в брусок чувствительный термометр (рис. 102) покажет, что при этом изменилась температура бруска: он нагрелся. Но повышение температуры связано с увеличением скорости движения молекул. Следовательно, при движении бруска происходит превращение его механического движения во внутреннее движение молекул бруска и стола.

На гидроэлектростанциях механическое движение воды превращается в движение электронов в проводниках или, что одно и то же, в электромагнитное движение. В свою очередь электромагнитное движение в нагревательных приборах превращается в движение молекул, а в электродвигателях — в механическое движение.

Все сказанное свидетельствует о том, что в *процессе взаимодействия тел одни формы движения могут превращаться в другие.*

Мерой механического движения является импульс тела. Однако импульс не может быть количественной мерой других видов движения, так как при преобразовании механического движения в другие виды импульс движущегося тела уменьшается и может стать даже равным нулю (как, например, в случае движения бруска по столу). Поэтому была введена специальная физическая величина — энергия. Изучая физику в VI и VII классах, вы уже познакомились с этим термином. Более того, вы знаете, что энергия бывает механическая (кинетическая и потенциальная), внутренняя (энергия молекул и атомов, из которых состоят тела), электрическая и атомная.

***Энергия** — это физическая величина, с помощью которой можно количественно охарактеризовать любое движение. Иными словами, энергия является универсальной количественной мерой движения.* Однако вместо того, чтобы говорить: "энергия механического движения", "энергия теплового движения", "энергия электромагнитного движения", принято говорить (и, разумеется, писать) короче: "механическая энергия", "внутренняя энергия", "электрическая энергия". При этом, однако, всегда следует помнить, что энергия — это только одна из характеристик движения и не существует сама по себе, отдельно от взаимодействующих тел, частиц и их движения.

## §40*. РАБОТА СИЛЫ

В результате взаимодействия энергия взаимодействующих тел может измениться. Для характеристики изменения энергии взаимодействующих тел введена специальная физическая величина — *работа силы.*

Допустим, что к телу приложена постоянная сила $F$, под действием которой оно переместилось по направлению силы на расстояние $s$ (рис. 103). Механическое состояние тела при этом изменилось, так как изменились его положение в пространстве и скорость.

Очевидно, что чем больше будет сила $F$ и расстояние $s$, тем при прочих равных условиях больше изменится состояние тела. Из курса физики VI класса вы знаете, что в том случае, когда направление силы совпадает с направлением перемещения, скалярная величина $A$, равная произведению модуля силы на модуль перемещения, названа работой силы:

$$\boxed{A = Fs.}$$

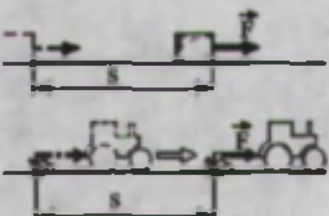


*Рис. 103*

*Рис. 104*

Однако направления силы и перемещения могут и не совпадать (рис. 104). Как вычислить работу в этом случае? Силу $\vec{F}$ представим как сумму двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

Так как тело в вертикальном направлении не перемещается, то сила $\vec{F}_2$ работы не совершает. Поэтому работа силы $\vec{F}$ равна работе силы $\vec{F}_1$. $A = F_1 s$. Но $F_1 = F\cos\alpha$, поэтому

$$\boxed{A = Fs\cos\alpha.}$$

Таким образом, *работа постоянной силы равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора перемещения и на косинус угла между этими векторами.*

За единицу работы в Международной системе единиц принята работа, совершаемая силой в 1 Н на пути, равном 1 м. Эту единицу в честь английского физика Джеймса Джоуля называют д ж о у л ь (1 Дж):

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

Кроме джоуля, для измерения работы применяют дольные и кратные единицы, а также внесистемные единицы:

1 ватт · час = 1 Вт · ч = 3600 Дж = $3{,}6 \cdot 10^3$ Дж;
1 гектоватт · час = 1 гВт · ч = 360 000 Дж = $3{,}6 \cdot 10^5$ Дж;
1 киловатт · час = 1 кВт · ч = 3 600 000 Дж = $3{,}6 \cdot 10^6$ Дж;
1 мегаватт · час = 1 МВт · ч = 3 600 000 000 Дж = = $3{,}6 \cdot 10^9$ Дж.

До сих пор мы считали, что направления силы и перемещения тела или совпадают, или образуют острый угол. А совершают ли работу силы, препятствующие движению, направление которых противоположно направлению движения? Например, совершают ли работу силы трения скольжения?

Для них $\cos\alpha = \cos 180° = -1$ и $A = -Fs$. Следовательно, работа таких сил отрицательна.

Отрицательную работу совершают, например, сила тяжести при подъеме тела вверх, сила сопротивления воды при входе прыгуна в воду, силы трения и т.д.

?

1. Какую физическую величину называют работой?
2. Что такое "отрицательная" работа?
3. Напишите формулу для подсчета работы.
4. В каких единицах измеряют работу в Международной системе единиц?
5. Какую работу совершил тяжелоатлет, равномерно подняв штангу массой 260 кг на высоту 2 м?

## §41. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАБОТЫ И ЭНЕРГИИ

Энергия — это общая (универсальная) количественная мера всех видов движений. Рассмотрим, как энергия связана с другими величинами, введенными для характеристики движения, как и в каких единицах она измеряется.

**1. Работа силы и кинетическая энергия.** Из курса физики VI класса известно, что кинетической энергией называют энергию, которой обладают движущиеся тела (или частицы). Найдем взаимосвязь между работой силы и кинетической энергией тела, на которое эта сила действует.

Допустим, что тело массой $m$ (рис. 105) движется по прямой без трения со скоростью $\vec{v}_1$ слева направо. В это время на него начинает действовать сила $F$, сообщающая ему ускорение. Тело проходит под действием силы расстояние $s$. В конце этого расстояния скорость тела стала $\vec{v}_2$. Найдем работу силы $F$.

Так как направления силы и перемещения совпадают, то работа силы может быть вычислена по формуле:

$$\boxed{A = Fs.}$$

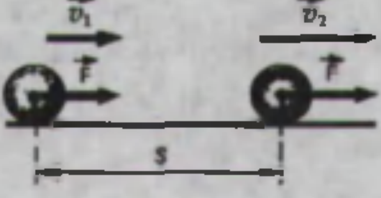


Рис. 105

Заменим в ней силу и перемешение через их значения:

$$F = ma = m\frac{v_2 - v_1}{t};\ s = v_{ср}t = \frac{v_1 + v_2}{2}t.$$

$$A = Fs = m\frac{v_2 - v_1}{t}\cdot\frac{v_1 + v_2}{2}t = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2).$$

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

В полученном выражении член $\frac{mv_2^2}{2}$ характеризует конечное состояние тела, а член $\frac{mv_1^2}{2}$ — его начальное состояние.

Так как в результате действия силы изменилась кинетическая энергия тела, то естественно предположить, что второй член равен кинетической энергии в момент времени, предшествующий действию силы, а первый член — кинетической энергии тела в конце действия силы:

$$W_{k1} = \frac{mv_1^2}{2};\ W_{k2} = \frac{mv_2^2}{2}.$$

Таким образом, работа силы равна изменению кинетической энергии тела:

$$A = W_{k2} - W_{k1} = \Delta W_k.$$

**2. Работа силы тяжести и потенциальная энергия.** Вы знаете, что потенциальной называют энергию взаимодействия тел и частиц, зависящую от их взаимного расположения. Потенциальная энергия системы тел, как и кинетическая, может изменяться.

Найдем связь между потенциальной энергией и работой силы тяжести. Допустим, что тело массой $m$ падает с высоты $h_1$ до высоты $h_2$ (рис. 106). Вычислим работу силы тяжести $Q$ на участке $h = h_1 - h_2$. В этом случае $A = Qs = Q(h_1 - h_2)$. Но $Q = mg$, следовательно, $A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$. Первый член в правой части полученного соотношения характеризует начальное состояние (положение) тела, а второй — конечное. Так как в результате падения тела изменилась его потенциальная энергия, то естественно допустить, что член $mgh_1$ равен потенциальной энергии тела в первом состоянии, а член $mgh_2$ - во втором состоянии. Обозначим потенциальную энергию буквой $W_p$, тогда:

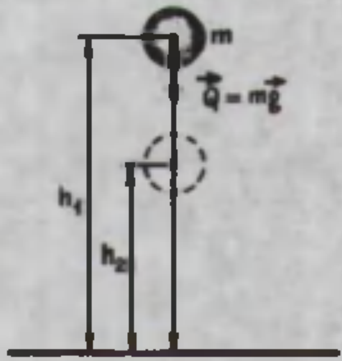


*Рис. 106*

$$W_{p1} = mgh_1;\ W_{p2} = mgh_2.$$

Таким образом, работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела:

$$A = W_{p1} - W_{p2} = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p.$$

Знак "—" означает, что в результате работы силы тяжести потенциальная энергия тела в поле тяготения уменьшается.

**3. Работа силы упругости и потенциальная энергия.** Предположим, что упруго деформированная (растянутая) пружина, сокращаясь, перемещает какое-то тело. Вычислим работу силу упругости при изменении длины пружины от $x_1$ до $x_2$ (рис. 107), т.е. на расстоянии $s = x_1 - x_2$.

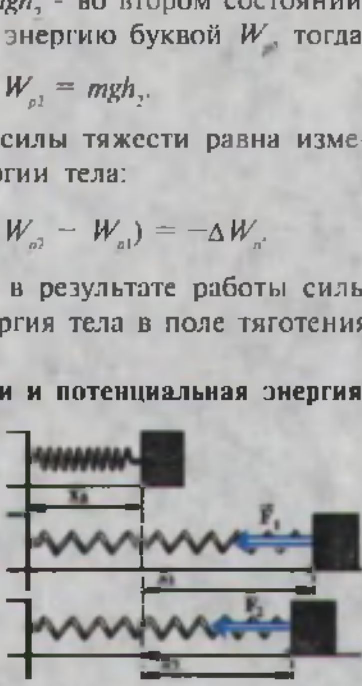


*Рис. 107*

Нам известно, что сила упругости зависит от деформации пружины, и в данном случае она изменяется от $F_1$ до $F_2$.

Так как сила — величина переменная, линейно зависящая от смещения, то для вычисления работы надо взять среднее значение силы:

$$F_{ср} = \frac{F_1 + F_2}{2}.$$

Но $F_1 = kx_1$; $F_2 = kx_2$. Поэтому $F_{ср} = \dfrac{kx_1 + kx_2}{2} =$

$= \dfrac{k}{2}(x_1 + x_2).$

Тогда $A = F_{ср}s = \dfrac{k}{2}(x_1 + x_2)(x_1 - x_2) = \dfrac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2).$

Таким образом, $A = \dfrac{kx_1^2}{2} - \dfrac{kx_2^2}{2}.$

Так как в результате работы упругой силы изменилась потенциальная энергия пружины, то естественно допустить, что первый член полученного выражения равен потенциальной энергии пружины в ее начальном состоянии, а второй — в конечном:

$$A = W_{p1} - W_{p2} = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p.$$

Таким образом, работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком.

Знак "—" показывает, что в результате работы, совершенной силой упругости, потенциальная энергия пружины уменьшилась.

**4. Работа — мера превращения энергии.** Рассмотренные выше примеры работы сил показывают, что во всех случаях работа силы равна изменению энергии тела. Следовательно, работа силы есть мера превращения одного вида энергии в другой:

$$A = \pm \Delta W.$$

Подводя итог всему сказанному, работе силы можно дать следующее определение:

*Работой называют скалярную физическую величину, являющуюся мерой превращения одного вида энергии в другой. Работа постоянной силы равна произведению модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между векторами силы и перемещения:*

$$A = Fs\cos\alpha.$$

В том случае, когда сила непостоянна, например, сила упругости, для расчета работы необходимо найти среднее значение силы на данном перемещении.

**5. Два важных вывода.** Так как работой называют скалярную величину, являющуюся мерой превращения одного вида энергии в другой, то из этого следует два простых, но очень важных вывода:

- Вывод первый: *энергия — величина скалярная.*
- Вывод второй: *энергия измеряется в тех же единицах, что и работа.*

**?**

**1.** Докажите, что работа силы $\vec{F}$, перемещающей тело по горизонтальному, абсолютно гладкому основанию, равна изменению кинетической энергии тела.

**2.** Докажите, что работа силы тяжести при падении тела с высоты $h_1$ до высоты $h_2$ равна изменению его потенциальной энергии.

**3.** Найдите работу пружины жесткостью $k$ при сокращении ее длины от $x_1$ до $x_0$, где $x_0$ — длина пружины в недеформированном состоянии.

**4.** Вычислите кинетическую энергию спутника Земли массой 2000 кг, движущегося по круговой орбите на высоте 200 км с периодом обращения 90 мин.

## §42. ЗАКОН ПРЕВРАЩЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**1. Превращение кинетической и потенциальной энергии.** В окружающем нас мире все движется, все изменяется. При этом происходят превращения одних видов движения в другие, а следовательно, и взаимопревращения видов энергии.

Рассмотрим примеры превращения энергии в механических процессах.

Многочисленные примеры свидетельствуют о том, что кинетическая и потенциальная энергии могут взаимно превращаться друг в друга. Приведем пример такого превращения.

Бросим вертикально вверх со скоростью $\vec{v}_0$ тело массой $m$ (рис. 108). В момент броска оно обладало кинетической энергией:

$$W_k = \frac{mv_0^2}{2}.$$

При подъеме скорость тела уменьшается. Следовательно, уменьшается и его кинетическая энергия. Но одновременно, поскольку тело движется вверх, возрастает его потенциальная энергия:

$$W_p = mgh,$$

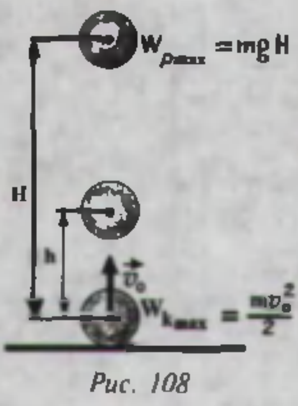



*Рис. 108*

где $h$ - высота подъема тела.

На максимальной высоте $H$ кинетическая энергия тела равна нулю, а потенциальная достигает максимального значения:

$$W_p = mgH.$$

Но максимальная высота подъема $H = \frac{v_0^2}{2g}$.

Подставив это значение высоты в формулу потенциальной энергии, получим:

$$W_p = mgH = mg\frac{v_0^2}{2g} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Мы видим, что при подъеме тела его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию, количественно оставаясь неизменной.

*При падении тела его потенциальная энергия преобразуется в равную ей по модулю кинетическую энергию.*

Тела могут обладать и потенциальной, и кинетической энергией одновременно. Например, в рассмотренных нами примерах в промежуточных точках траектории тело обладало и потенциальной, и кинетической энергией. Сумму потенциальной и кинетической энергии называют *полной механической энергией*. Ее обозначают обычно буквой $E$:

$$\boxed{E = W_k + W_p.}$$

**2. Закон сохранения механической энергии.** Допустим, что в замкнутой (изолированной) системе тел, в которой не действуют силы трения и нет неупругих деформаций, внутренние силы в процессе взаимодействия тел совершили работу $A$. Эта работа приведет к изменению потенциальной и кинетической энергии системы. Выразим работу внутренних сил системы через изменения ее кинетической и потенциальной энергии:

$$A = W_{k2} - W_{k1} \text{ и } A = W_{p1} - W_{p2}.$$

Так как работа $A$ одна и та же, то, приравняв правые части этих равенств, получим:

$$W_{k2} - W_{k1} = W_{p1} - W_{p2}.$$

Раскрыв скобки и сгруппировав члены, относящиеся к одному и тому же состоянию системы, получим:

$$W_{k2} + W_{p2} = W_{k1} + W_{p1} \text{ или } W_{k1} + W_{p1} = W_{k2} + W_{p2}.$$

В левой части равенства стоит полная механическая энергия системы до взаимодействия, а в правой — полная механическая энергия после взаимодействия. Из их равенства следует, что полная механическая энергия изолированной системы, в которой не действуют силы трения и нет упругих деформаций, при всех изменениях в системе остается постоянной:

$$E = W_k + W_p = \text{const}.$$

● Полученную закономерность называют ***законом сохранения механической энергии***.

**?** 1. На примере тела, брошенного вертикально вверх со скоростью $v_0$, докажите, что полная механическая энергия изолированной системы остается постоянной.
2. Сформулируйте закон сохранения и превращения механической энергии.
3. Вычислите максимальную высоту подъема стрелы, выпущенной из лука вертикально вверх. Начальная скорость стрелы 40 м/с. (Сопротивление воздуха движению стрелы не учитывать).

## §43*. ЗАКОН ПРЕВРАЩЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ЛЮБЫХ СИСТЕМАХ

***Лабораторная работа № 5***

**Фундаментальный закон природы.** В предыдущем параграфе мы рассмотрели превращения механической энергии в изолированных системах, в которых не было сил трения и неупругих деформаций. Однако всегда в любой системе тел существуют трение и неупругие деформации, которые вызывают уменьшение полной механической энергии системы. Об этом свидетельствуют, например, такие факты: размах колебаний маятника постепенно уменьшается, и он останавливается; тело, брошенное вверх со скоростью $v_0$, падает на землю с несколько меньшей скоростью и т.д. Выходит, закон сохранения энергии несправедлив?

Не спешите с выводами.

Дело в том, что силы трения и неупругие деформации при взаимодействии тел обуславливают превращение части механической энергии в энергию движения молекул и тела нагреваются. В этом можно убедиться как на специально поставленных опытах, так и на явлениях, происходящих в повседневной жизни.

Например, при резком торможении автомобиля, в результате трения колес об асфальт, покрышки колес порой нагреваются так сильно, что резина плавится и на асфальте остается хорошо заметный след.

При длительном качании на качелях веревка, перекинутая через деревянный брус, нагревается так сильно, что брус на месте контакта обугливается.

Металлическая деталь и резец токарного станка нагреваются при обработке очень сильно, и для их охлаждения к месту резания подают специальную жидкость (эмульсию).

Приведенные примеры говорят о том, что механическая энергия может превращаться во внутреннюю энергию тел, в энергию движения их молекул.

Многочисленные опыты, поставленные в лучших физических лабораториях мира, показали, что превращенная часть механической энергии в точности равна увеличению внутренней энергии, а полная энергия изолированной системы и в этом случае остается постоянной. Это и есть закон превращения и сохранения энергии.

*Полная энергия изолированной системы остается постоянной при всех изменениях, происходящих внутри этой системы.*

Закон превращения и сохранения энергии является фундаментальным законом природы.

При объяснении этого закона мы ссылались на отдельные опыты и наблюдения. Однако следует иметь всегда в виду, что, подобно законам движения, закон превращения и сохранения энергии вытекает из всей совокупности фактов, которыми располагает современная наука. Его справедливость подтверждена многовековой практикой человеческой деятельности. Нет и не может быть явлений, машин, механизмов и устройств, в которых нарушался бы закон сохранения энергии.

С помощью закона сохранения и превращения энергии решено огромное число различных проблем не только в физике, но и в других науках.

Решите и вы с его помощью маленькую экспериментальную задачу: определите силу трения шашки (шайбы или бруска) о наклонную плоскость.

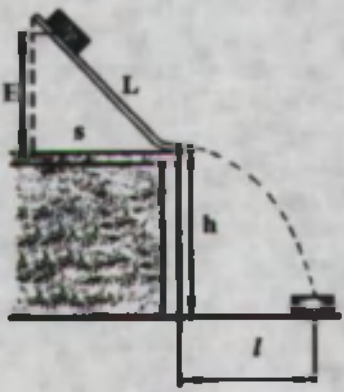



*Рис. 109*

1. Соберите установку, изображенную на рис. 109. Наклонную плоскость надо покрыть полоской картона или линолеума так, чтобы внизу она плавно перешла в горизонтальную плоскость стола.

2. Опустите шашку (шайбу или брусок) с верхней точки наклонной плоскости и отметьте место ее падения на пол.

3. Измерьте: а) длину, высоту и основание наклонной плоскости; б) высоту стола, с конца которого падает шашка; в) расстояние по горизонтали, которое пролетела шашка по воздуху.

Все данные измерений запишите в таблицу.

| |
|---|
| Высота наклонной плоскости, $H$ – |
| Длина наклонной плоскости, $L$ – |
| Основание наклонной плоскости, $s$ – |
| Высота падения шашки, $h$ – |
| Среднее расстояние, пройденное шашкой по горизонтали, $l$ – |
| Масса шашки, $m$ – |

Среднее расстояние, которое пролетит шашка по горизонтали, определите, повторив опыт несколько раз.

**Домашнее задание.** По данным, полученным в ходе опыта, определите самостоятельно силу трения, а если будет желание, то и коэффициент трения скольжения.

### *Упражнение 9*

**1.** Подъемный кран равномерно перемещает груз вверх со скоростью 5 м/с. Его двигатель развивает мощность 20 кВт. Какова масса груза, если подъем осуществляется за счет 90% мощности двигателя? (Ответ: $m = 360$ кг).

**2.** Найдите потенциальную и кинетическую энергию тела массой 20 кг, свободно падающего с высоты 20 м, на расстоянии 1 м от поверхности Земли. (Сопротивление воздуха не учитывать). (Ответ: $W_k = 3724$ Дж; $W_p = 196$ Дж).

**3.** Тело брошено вертикально вверх со скоростью 20 м/с. На какой высоте его кинетическая энергия будет равна потенциальной? (Ответ: $h = 10$ м).

**4.** Человек массой 100 кг, скатившись с горы на лыжах, проехал по горизонтальному участку дороги 20 м. Найдите работу сил трения на этом участке, если коэффициент трения лыж о снег 0,02. (Ответ $A_{тр} = -400$Дж).

**5.** Вычислите ориентировочно мощность гидроэлектростанции, если известно, что каждую секунду через ее турбины проходит 5000 м$^3$ воды, а КПД гидроэлектростанции 0,9. Турбина расположена ниже уровня воды в плотине на 100 м. (Ответ $P = 4,5 \cdot 10^9$ Вт).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ IX

**1.** При взаимодействии тел одни формы движения могут превращаться в другие. Для характеристики этого процесса введены специальные величины: энергия и работа.

**2.** Энергией называют скалярную физическую величину, являющуюся общей количественной мерой различных форм движения и взаимодействия материи.

**3.** Энергию, связанную с движением тел, называют кинетической; она пропорциональна массе тела и квадрату скорости его движения:

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

**4.** Потенциальной энергией называют энергию взаимодействия тел, зависящую от их взаимного положения. Потенциальная энергия поднятого над Землей тела равна: $W_p = mgh$, а потенциальная энергия упруго деформированного тела равна: $W_p = \frac{kx^2}{2}$.

**5.** Одним из основных законов природы является закон превращения и сохранения энергии, сущность которого можно кратко передать следующим образом. Полная энергия замкнутой системы остается постоянной при всех изменениях, происходящих внутри этой системы:

$$E = \text{const}.$$

**6.** Работой называют скалярную физическую величину, являющуюся мерой превращения одного вида энергии в другой. Работа постоянной силы равна произведению модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между вектором силы и вектором перемещения:

$$A = W = Fs \cos\alpha.$$

# ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ[1]

До этого момента вы изучали движение и взаимодействие твердых тел, в процессе чего были установлены три закона Ньютона, законы сохранения энергии и импульса изолированной системы тел. Как будет показано ниже, эти законы применимы и к движению и взаимодействию жидкостей и газов, но при этом надо учитывать их специфические свойства.

В отличие от твердых тел жидкости и газы не имеют определенной формы, а принимают форму того сосуда, в который они помещены. Жидкости и газы изменяют свою форму под действием сколь угодно малых сил.

При рассмотрении движений и взаимодействий жидкостей и газов их разбивают мысленно на отдельные малые частицы (элементы), состоящие из сравнительно большого числа атомов. К этим частицам и применяют законы механики.

В тех случаях, когда изучаются процессы в покоящихся жидкостях и газах или в таких движениях, при которых взаимное расположение выделенных элементов рассматриваемого объема жидкости или газа не изменяется, их можно рассматривать как твердое тело. Этот прием получил название принципа отвердения. В этом случае к жидкости и газу применимы понятия центра масс, момента силы, условия равновесия и т.п.

---

[1] Этот раздел написал к.п.н У.Д. Шодиев.

# Глава X. ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА

Гидро- и аэростатика изучает условия равновесия жидкостей и газов. При этом, как уже было сказано выше, используется прием отвердения, позволяющий рассматривать объем жидкости или газа как твердое тело.

## §44. ДАВЛЕНИЕ В ПОКОЯЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

**1. Расчет давления.** Возьмем стеклянный цилиндр, нижнее основание которого затянуто тонкой резиновой пленкой (рис. 110). Налив в цилиндр воду, заметим, что резиновая пленка прогнулась. Опыт свидетельствует, что вода давит на дно цилиндра. Очевидно, что сила давления равна силе тяжести столба воды:

*Рис. 110*

$$F = mg.$$

Но масса воды $m = \rho V$, $\rho$ — плотность, а $V$ — объем воды. Из геометрии известно, что:

$$V = Sh,$$

где $S$ — площадь основания цилиндра, а $h$ — высота столба жидкости. Таким образом:

$$F = mg = \rho Vg = \rho Shg.$$

Найдем давление воды на дно цилиндра. По определению давление:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Подставив значение силы тяжести, получим:

$$\boxed{p = \rho hg.}$$

Таким образом, *давление жидкости зависит от ее плотности и высоты столба жидкости.*

**2. Сообщающиеся сосуды.** Возьмем *U*-образную стеклянную трубку и нальем в нее воду (или любую другую жидкость). Заметим, что в обоих коленах *U*-образной трубки уровни жидкости одинаковы (рис. 111). Опыт означает, что давление жидкости в соединительной трубке со стороны правого и левого колен одинаково и направлено в противоположные стороны.

Если же в колена *U*-образной трубки налить две жидкости разной плотности, например чистое автомобильное смазочное масло ($\rho_1 \approx 900$ кг/м$^3$) и масло, в котором во взвешенном состоянии находятся очень мелкие железные опилки ($\rho_2 > 1000$ кг/м$^3$), уровни масел в коленах *U* - образной трубки будут разными.

Равновесие жидкостей в коленах *U* - образной трубки наступит тогда, когда давление в средней части трубки со стороны правого колена будет равно давлению со стороны левого колена: $p_л = p_п$. Но $p_л = \rho_1 h_1 g$, а $p_п = \rho_2 h_2 g$ . Следовательно,

$$\rho_1 h_1 g = \rho_2 h_2 g, \ \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

$$\text{или } \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

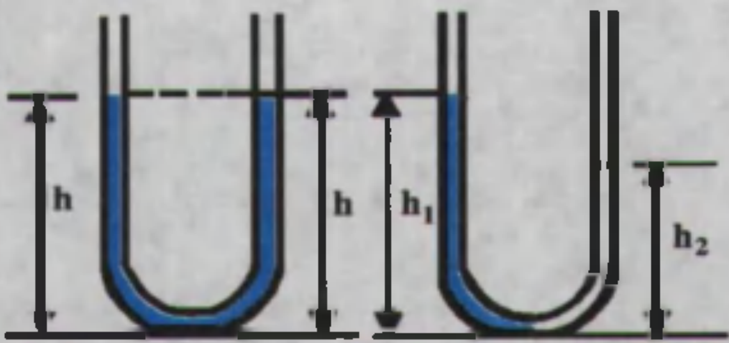



*Рис. 111*

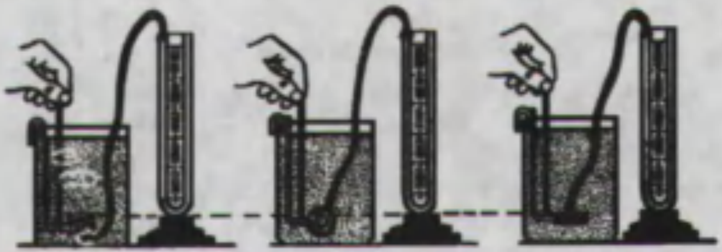


*Рис. 112*

**3. Жидкостный манометр и датчик давления.** Сообщающиеся сосуды используются при измерении давления внутри жидкости. Для этого одно колено *U*-образной трубки соединяется гибкой трубкой с датчиком давления — полым тонким цилиндром, затянутым тонкой резиновой пленкой (рис. 112). Жидкость давит на резиновую пленку, и это давление через столбик воздуха передается на столбик жидкости в том колене, которое соединено с датчиком. По разности высот определяется давление в соответствующих единицах, например, в миллиметрах водяного (ртутного, спиртового) столба.

?

1. В чем заключается принцип отвердения?
2. Чем отличаются жидкости и газы от твердых тел?
3. Можно ли применять законы механики, установленные для твердых тел, к жидкостям и газам?
4. Применимы ли закономерности статики, установленные для твердых тел, к жидкостям и газам?
5. Водолаз работает под водой на глубине 50 м. Найдите давление воды на шлем водолаза и на его бахилы (подводные сапоги). Рост водолаза 180 см.

## §45. АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Наша планета Земля окружена воздушной оболочкой, толщина которой около 1000 км. Молекулы газов, входящих в состав воздуха, удерживаются у Земли благодаря силам тяготения. Для того, чтобы покинуть

Землю, молекулы должны иметь скорость, превышающую первую космическую скорость.

Мы живем на дне воздушного океана. Воздух давит на все предметы, находящиеся на Земле, со всех сторон. Это давление получило названис *атмосферного давления*.

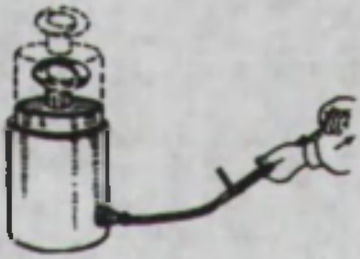


*Рис. 113*

**1. Опыты, подтверждающие существование атмосферного давления.** Если из цилиндра с поршнем выкачать воздух (рис. 113), поршень втянется в цилиндр. Естественной причиной вталкивания поршня в цилиндр является давление воздуха.

По мере вытекания воды из пластмассового пакета пакет сжимается. Причиной сжатия пакета также является атмосферное давление.

Если бутылку с узким горлом, наполненную водой, опустить открытым горлом вниз, вода не вытекает. Вытеканию воды препятствует атмосферное давление.

В 1654 г. немецкий физик Отто фон Герике проделал интересный опыт. По его указанию были изготовлены два медных полушария с прочными ручками. Полушария плотно подходили одно к другому так, что между ними не мог проникнуть воздух. Сложив полушария вместе, Герике откачал из образовавшегося шара воздух, закрыл краны в трубке, через которую откачивали воздух, и, прикрепив к ручкам полушарий прочные ремни, впряг в них лошадей. Шесть лошадей с одной стороны и столько же с другой не смогли оторвать полушария одно от другого. Только тогда, когда впрягли по 8 лошадей, полушария удалось разорвать (рис. 114).

**2. Почему атмосферное давление нельзя рассчитать по формуле $p = \rho hg$?** Формула для расчета давления в жидкости:

$$p = \rho hg$$

не применима для расчета атмосферного давления, так как, **во-первых**, плотность воздуха различна на различной высоте. (В таблице, представленной ниже, приведены значения плотности воздуха на различных высотах над поверхностью Земли). **Во-вторых,** высоту атмосферы точно установить нельзя, так как она переходит в космическое пространство постепенно и лишь примерно считается равной 1000 км. Поэтому атмосферное давление измеряется экспериментально.

| Высота, км | 0 | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Плотность, кг/м³ | 1,2 | 0,4 | 0,09 | 0,004 | 0,0003 | 0,00001 |

**3. Измерение атмосферного давления.** Впервые атмосферное давление было измерено итальянским ученым Эванджелистой Торричелли в 1642 г. Для этого Торричелли взял запаянную с одного конца трубку и заполнил ее ртутью до краев (рис. 115). Закрыв один конец трубки пальцем, перевернул трубку, опустил открытым концом в чашу и убрал палец. Небольшая часть ртути из трубки вытекла, а большая часть осталась в трубке на отметке 76 см. Почему не вытекла из трубки вся ртуть? Объяснение состоит в том, что этому противодействует

*Рис. 114*

атмосферное давление. В этом случае трубка и окружающий ее воздух образуют как бы $U$-образный сосуд, одно колено которого — трубка, а другое — столб воздуха.

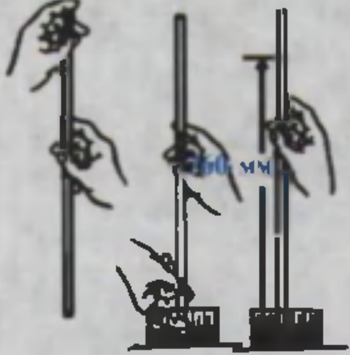


*Рис. 115*

Торричелли проводил свой опыт с трубками разного диаметра и формы, наклонял трубку и обнаружил, что высота ртутного столба остается одинаковой. Оказалось, что на уровне океана в ясную погоду при температуре 20°С высота столбика ртути равна 760 мм.

Мы не случайно написали, что при температуре 20°С в ясную погоду давление на уровне океана равно 760 мм. Дело в том, что это давление зависит от погоды и высоты того места, где проводятся измерения.

Итак, атмосферное давление уравновешивается столбиком ртути высотой 760 мм. Вычислим это давление. Плотность ртути при 20°С равна 13 596 кг/м$^3$. Подставив известные нам данные в формулу давления, получим:

$$p = \rho h g = 13596\ \text{кг/м}^3 \cdot 9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 0{,}76\ \text{м} = 101325\ \text{Па}.$$

$$p = 101325\ \text{Па}.$$

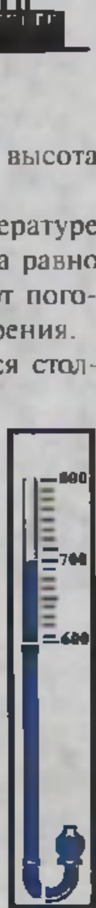


*Рис. 116*

**4. Приборы для измерения атмосферного давления.** Прибор для измерения атмосферного давления назвали *барометром*. Название образовано из сочетания греческих слова "барос" — давление и "метрео" — измерение: измеритель давления.

Первичным измерителем давления является ртутный барометр, состоящий из стеклянной трубки с ртутью и измерительной миллиметровой шкалы. Это те же части прибора, которые использовал Торричелли (рис. 116).

Ртутные барометры применяются, в основном, в специальных лабораториях, но для повседневного измерения давления на производстве, транспорте и в быту из-за их громоздкости (высота их примерно 1 м) и из-за неизбежного испарения ртути, пары которой весьма ядовиты, они неудобны. Поэтому были созданы барометры — анероиды. Слово "анероид" происходит от греческого слова, означающего "безжидкостный".

Барометр-анероид состоит из датчика давления, которым является прочная металлическая коробочка, герметически закрытая металлической гофрированной крышкой (рис. 117). Воздух из коробочки выкачан. При изменении атмосферного давления гибкая гофрированная крышка датчика прогибается то больше, то меньше. Крышка тем или иным способом соединяется со стрелкой — указателем давления. Сзади стрелки расположена шкала, проградуированная с помощью ртутного барометра или в миллиметрах ртутного столба, или в гектопаскалях, а иногда и в миллиметрах ртутного столба, и в паскалях.

**5. Устройства, использующие атмосферное давление.** Существует большое число устройств, в которых используется атмосферное давление. К числу таких устройств относятся насосы.

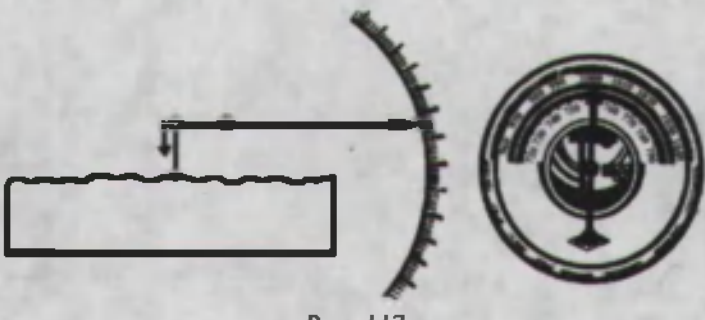


*Рис. 117*

Всасывающие насосы для подъема воды были известны уже в III в. до н. э. Устройство простейшего всасывающего насоса показано на рис. 118. Основной частью насоса является цилиндр 1, в котором движется плотно прилегающий к стенкам цилиндра поршень 2. Цилиндр соединен с трубкой 3, через которую происходит всасывание воды. Отверстие, через которое цилиндр соединен с всасывающей трубой, закрывается клапаном $K_1$. В поршне имеется отверстие, которое закрывается клапаном $K_2$.

При движении поршня вверх (рис. 118, *a*) под клапаном $K_1$ образуется разреженное пространство, поэтому атмосферное давление заставляет воду подниматься по всасывающей трубе вверх. Клапан $K_1$ с помощью воды поднимается, и вода вслед за поршнем поступает в цилиндр. Клапан $K_2$ в это время закрыт.

При движении поршня вниз (рис. 118, *b*) клапан $K_1$ закрывается. Вода приподнимает клапан $K_2$ и через образовавшееся отверстие проходит в верхнюю часть цилиндра.

При последующем движении клапана вверх происходят два процесса: первый состоит в том, что в цилиндр засасывается новая порция воды, а второй — в том, что вода, находящаяся над клапаном, выливается через трубу 4 в резервуар для приемки воды (рис. 118, *d*).

Нагнетательные насосы предназначены для накачивания жидкости или газа в какой-либо сосуд. Например, нагнетательный воздушный насос используется для накачивания футбольных мячей и велосипедных камер, а также в тех случаях, когда надо создать большое давление (например, пожарные насосы, выбрасывающие струю воды на большие расстояния).

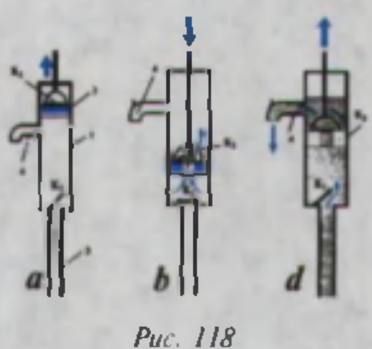


*Рис. 118*

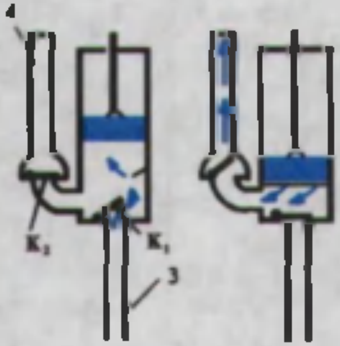



Рис. 119

Устройство нагнетательного насоса показано на рис. 119. При движении поршня вверх под поршнем давление падает, под действием атмосферного давления жидкость по трубе 3 поднимается, открывает клапан $K_1$ и проходит в цилиндр. Клапан $K_2$ при этом закрыт.

При обратном движении поршня вниз клапан $K_1$ закрывается, а жидкость, подняв клапан $K_2$ под действием поршня, поступает в трубу 4.

**?**

1. Какие известные вам опыты подтверждают существование атмосферного давления?
2. *Почему атмосферное давление нельзя подсчитать по формуле $p = \rho hg$?*
3. С какой наибольшей глубины можно поднять воду с помощью всасывающего насоса? Почему?
4. На какую наибольшую высоту можно поднять воду с помощью нагнетательного насоса? Почему?
5. Глубина колодца 15 м. Какой насос и где надо расположить, чтобы накачивать воду?

## §46. ЗАКОН ПАСКАЛЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

**1. Закон Паскаля.** Опустим датчик давления в сосуд с водой (рис. 120). По манометру определим давление воды на заданной высоте. Не меняя глубину погружения датчика, с помощью специального приспособления повернем датчик на 45°. Давление не изменилось. Повернем датчик еще на 45°. Давление по-прежнему осталось неизменным. Опыт свидетельствует, что давление жидкости на заданной высоте постоянно и не зависит от положения датчика.

Возьмем барометр-анероид и проделаем аналогич-


Рис. 120

ный опыт, поворачивая барометр так, чтобы положение датчика давления не изменялось. Опыт показывает, что давление воздуха на заданной высоте также не зависит от положения датчика.

Опыты дают основание утверждать, что давление неподвижной жидкости или газа не зависит от расположения площадки, на которую оно действует.

В проделанных опытах речь шла о давлении, создаваемом силами тяжести, действующими на жидкость или газ. Выясним, как передают жидкости и газы производимое на них внешнее давление.

Для этого наполним прибор, изображенный на рис. 121 водой. Резко нажав на поршень, заметим, что через все отверстия в шаре начнут разбрызгиваться струи воды.

Опыт свидетельствует о том, что внешнее давление, производимое на жидкость, как и собственное давление неподвижной жидкости (которое называют гидростатическим), не зависит от расположения площадки и передается по всем направлениям одинаково.

Впервые к этому выводу пришел французский физик Блез Паскаль. Поэтому его назвали законом Паскаля.

*Давление, производимое на жидкость или газ внешними силами, передается ими по всем направлениям одинаково.*

Рис. 121

Это свойство жидкостей и газов широко используется в современной технике. Рассмотрим несколько примеров такого использования.

**2. Гидравлический подъемник.** Для подъема тел большой массы в производстве широко используются *гидравлические подъемники.* На рис. 122 показана упрощенная схема гидравлического подъемника. Нагнетательный насос площадью поршня $S_1$ соединен маслопроводом с цилиндром, в котором ходит поршень площадью $S_2 = 100S_1$, и с баком, в котором хранится масло, необходимое для работы подъемника.

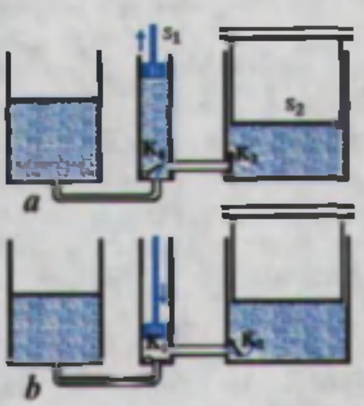



*Рис. 122*

При движении поршня насоса вверх (рис. 122, *a*) клапан $K_1$, расположенный у маслопровода, соединяющего насос с резервуаром масла, откроется, а клапан $K_2$ в цилиндре подъемника закроется. В результате цилиндр насоса заполнится маслом.

При движении поршня вниз (рис.122, *b*) клапан $K_1$ закроется, а клапан $K_2$ откроется, и масло под давлением $p$, созданным внешней силой, пройдет в цилиндр подъемника, где давление также будет $p$.

Сила, с которой поршень насоса действует на масло, $F_1 = pS_1$. Отношение этих сил:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{pS_1}{pS_2}, \text{ откуда } F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}.$$

В нашем случае $F_2 = 100F_1$. Как видим, гидравлический подъемник дает выигрыш в силе.

**3. Гидравлический тормоз.** Для того, чтобы при торможении автомобиль не занесло в ту или иную сторону, торможение правых и левых колес должно быть

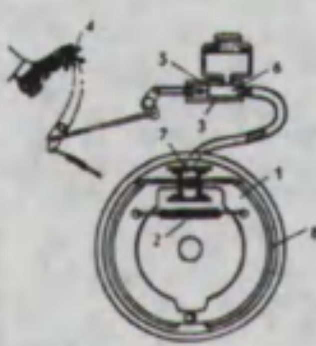



Рис. 123

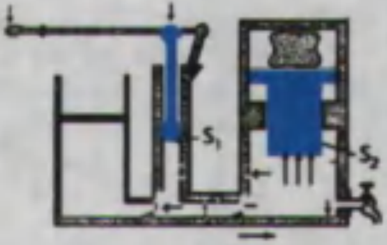



Рис. 124

одновременным и совершенно одинаковым. Для этого в автомобилях используется *гидравлический тормоз.*

На рис. 123 показана схема устройства такого гидравлического тормоза. В обычном состоянии тормозные колодки 1 в колесе стянуты пружиной 2, которая уравновешивает небольшое давление масла в цилиндре 3. При торможении водитель нажимает на педаль тормоза 4. Соединенный с тягой 5 поршень 6 давит на масло, которое передает давление на поршни, расположенные в тормозном цилиндре 7. Поршни давят на тормозные колодки 8.

**4. Гидравлический пресс** широко применяется на современных производствах, например, для прессовки металлических и пластмассовых деталей, сена или хлопка, для выдавливания масла из семян масличных растений и т. п. Гидравлический пресс устроен примерно так же, как и гидравлический подъемник, но

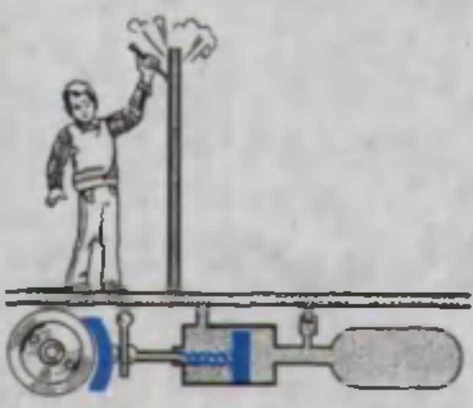


Рис. 125

только имеет опорную раму. Прессуемое тело сжимается между рамой и поршнем. Изучите устройство гидравлического пресса по рис. 124.

**5. Пневматический тормоз.** В пассажирских железнодорожных вагонах устанавливают так называемые краны экстренного торможения. На рис. 125 показано устройство, связанное с этим краном. В нормальном состоянии давление воздуха на поршень в тормозных цилиндрах справа и слева одинаково, так как к ним подходит сжатый воздух из одного и того же резервуара.

Дернув за ручку тормозного крана, пассажир выпустит воздух из магистральной трубы и, следовательно, из правой части цилиндра. Поршень переместится вправо и прижмет тормозные колодки к колесам.

?

1. Сформулируйте и объясните закон Паскаля.
2. По рис. 123 объясните работу гидравлического тормоза автомобиля.

## §47. ЗАКОН АРХИМЕДА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Закон Архимеда был открыт экспериментальным путем. *Существует легенда о непосредственном толчке* к его открытию: сиракузский царь Гиерон заподозрил, что одна из его золотых корон изготовлена не из чистого золота, а из сплава золота со свинцом, медью и другими металлами. Решить вопрос о материале короны царь поручил Архимеду. Сохранилось предание, что идея решения пришла ему в голову в тот момент, когда он погрузился в ванну. Архимед, якобы возбужденный пришедшей ему идеей, выскочил из ванны и побежал по улице с криком "Эврика! Эврика!", что значит "Нашел! Нашел!".

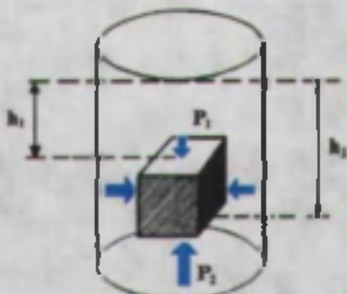


*Рис. 126*

**1. Закон Архимеда.** Зная закон Паскаля, закон Архимеда можно вывести теоретически. Допустим, что в жидкости, плотностью $\rho$, находится тело. Для простоты допустим, что тело имеет форму куба (рис. 126).

По закону Паскаля давление на верхнюю грань куба:

$$p_1 = \rho h_1 g.$$

А результирующая сила давления на эту грань $F_1 = p_1 S = \rho g h_1 S$. Эта сила направлена вертикально вниз. Аналогично сила давления на нижнее основание $F_2 = \rho g h_2 S$. Эта сила направлена вертикально вверх.

Силы давления на боковые грани куба одинаковы и попарно противоположны. Поэтому они уравновешивают друг друга.

Равнодействующая сила давления жидкости на тело $R = F_2 - F_1 = \rho g h_2 S - \rho g h_1 S = \rho g (h_2 - h_1) S$. Но $(h_2 - h_1) S = h_x S = V$. Таким образом, $R = \rho g V$. Эта сила направлена вертикально вверх.

Поэтому, если тело, погруженное в жидкость, удерживается в жидкости в равновесии, то со стороны окружающей жидкости на него действует выталкивающая сила гидростатического давления, численно равная весу жидкости в объеме, вытесненном телом. Эта сила приложена к центру масс жидкости, вытесненной телом.

Последнее утверждение не очевидно, но его легко доказать. Если бы это было не так, любое плавающее в жидкости однородное тело пришло бы во вращение. Все сказанное справедливо и для газов.

Сформулируем закон Архимеда:

*На всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (или газа), направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема жидкости (или газа).*


*Рис. 127*

**2. Измерение плотности жидкости. Ареометр.** Для быстрого определения плотности жидкости создан прибор — *ареометр*, действие которого основано на использовании закона Архимеда. На рис. 127 показан внешний вид прибора. Это стеклянная трубка, в нижней части которой закреплен груз *M*.

Для градуировки шкалы эталонного ареометра его последовательно опускают в жидкости, плотности которых точно известны (плотность жидкостей можно определить по формуле $\rho = \frac{m}{V}$), и каждый раз отмечают глубину погружения. По этим данным создают шкалу ареометра. По эталонному ареометру делают серию ареометров.

**3. Плавание судов.** Выясним, какие тела могут плавать на поверхности воды. Так как на любое плавающее в воде тело, помимо силы тяжести со стороны жидкости, действует выталкивающая сила, то очевидно, что тело будет находиться в состоянии равновесия тогда и только тогда, когда эти две силы будут уравновешивать друг друга. Математически это можно выразить так: $Q = F_{\text{г}}$, или

$$m_{\text{т}}g = \rho_{\text{ж}}gV_{\text{ж}}, \text{ или } \rho_{\text{т}}V_{\text{т}}g = \rho_{\text{ж}}V_{\text{ж}}g,$$

$$\text{откуда } V_{\text{ж}} = \frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{ж}}}V_{\text{т}}.$$

Проанализируем эту формулу.

а) Если плотность тела равна плотности жидкости $\rho_{\text{т}} = \rho_{\text{ж}}$, то $V_{\text{ж}} = V_{\text{т}}$, т.е. объем вытесненной телом жидкости равен объему тела и тело будет находиться в жидкости в безразличном равновесии. В таком, например, состоянии находятся рыбы или подводные лодки при движении под водой.

б) Если плотность тела меньше плотности жидкости $\rho_т < \rho_ж$, то $V_ж < V_т$, т.е. тело будет погружено в жидкость лишь частично. Например, сухое дерево с плотностью $\rho_т = 800$ кг/м³ будет плавать в воде ($\rho_ж$ = 1000 кг/м³) так, что его погруженная часть равна весу вытесненной им жидкости,

$$V_ж = \frac{800 \text{ кг/м}^3}{1000 \text{ кг/м}^3} V_т = 0{,}8\ V_т,$$

т.е. сосновое бревно будет плавать так, что в воде окажется только 0,8 его объема.

в) Если $\rho_т > \rho_ж$, то $V_ж > V_т$, т.е. в этом случае материалу тела надо придать такую форму, при которой вес вытесняемого им объема жидкости стал бы больше собственного веса тела. Так поступают при строительстве судов. Объем воды, вытесняемой полностью загруженным кораблем, называют его *водоизмещением*. В этом случае уровень погружения корабля в воду отмечают особой линией, получившей название *ватерлинии* (буквально: линия воды). Обычно подводную часть корабля красят одним цветом, а надводную — другим. Таким образом, ватерлиния на корпусе корабля — это линия разделения подводной части корабля при полной загрузке и надводной части. По положению ватерлинии можно судить о степени загрузки корабля.

**4. Воздухоплавание.** Допустим, что мы имеем оболочку шара массой $m_1$, рассчитанную на объем газа $V$. Наполним эту оболочку газом, плотность которого меньше плотности воздуха у поверхности Земли ($\rho_0$ = 0,8 кг/м³), например, гелием ($\rho_0$ = 0,13 кг/м³). Допустим также, что трубка, через которую шар наполнялся гелием, закрыта.

Обозначим силу тяжести шара, наполненного газом $Q$. Воздух действует на шар с выталкивающей силой:

$$F = \rho_0 V g.$$

Рассмотрим возможные варианты поведения шара.

а) $Q > F$ — шар будет лежать на поверхности Земли. Его вес:

$$P = Q - F.$$

б) $Q = F$ — шар будет покоиться у поверхности Земли. Его вес:

$$P = Q - F = 0.$$

в) $Q < F$ — шар начнет подниматься над поверхностью Земли. Его подъемная сила $F_п = F - Q$.

Так как плотность воздуха по мере поднятия шара уменьшается, то наступит момент, когда выталкивающая сила F станет равной силе тяжести шара $F = \rho Vg$. В этот момент подъем шара прекратится, шар "зависнет".

?

1. Выведите формулу, выражающую закон Архимеда, взяв вместо куба прямоугольный параллелепипед.
2. В стакане воды плавает кусочек льда. Как изменится уровень воды в стакане после того, как лед растает?
3. Плотность морской воды 1000 кг/м³, плотность льда 900 кг/м³. Определите, какая часть плавающей льдины находится под водой?
4. Как бы вы решили задачу, поставленную перед Архимедом царем сиракуз?
5. Допустим невероятное: вы не умеете плавать и оказались в спокойном море. Помощи в течение 30 мин ждать неоткуда. Ваша масса 54 кг, а объем 56 дм³. Есть ли у вас возможность не утонуть? Если есть, то, что для этого нужно сделать?

## §48. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АРХИМЕДОВОЙ СИЛЫ

### *Лабораторная работа № 6*

***Цель работы:*** выявить на опыте выталкивающее действие жидкости на погруженное в нее тело и определить Архимедову силу.

***Приборы и материалы:*** динамометр, штатив с муфтой и лапкой, два тела разного объема, стаканы с водой и насыщенным раствором соли в воде.

*Указания к работе.*

**1.** Укрепите динамометр на штативе и подвесьте к нему на нити тело. Отметьте и запишите в таблице показание динамометра. Это будет вес тела в воздухе.

**2.** Подставьте стакан с водой и опускайте муфту с лапкой и динамометром, пока все тело не окажется под водой. Отметьте и запишите в таблицу показание динамометра. Это будет вес тела в воде.

**3.** По полученным данным вычислите выталкивающую силу, действующую на тело.

**4.** Вместо чистой воды возьмите насыщенный раствор соли и снова определите выталкивающую силу, действующую на то же тело.

**5.** Подвесьте к динамометру тело другого объема и определите указанным способом выталкивающую силу, действующую на него в воде.

**6.** Результаты запишите в таблицу.

| Жидкость | Вес тела в воздухе $P$, Н | | Вес тела в жидкости $P_1$, Н | | Выталкивающая сила $F$, Н $F = P - P_1$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_{V_1}$ | $P_{V_2}$ | $P_{1V_1}$ | $P_{1V_2}$ | $F_{V_1}$ | $F_{V_2}$ |
| Вода | | | | | | |
| Насыщенный раствор соли в воде | | | | | | |

На основе выполненных опытов сделайте выводы.

### *Упражнение 10*

**1.** Атмосферное давление, измеренное ртутным барометром, оказалось 750 мм рт. ст. Выразите это давление в гектопаскалях.

**2.** Можно ли в космическом корабле велосипедным насосом накачать воздух в велосипедное колесо?

**3.** На какую максимальную высоту можно поднять воду из колодца всасывающим насосом? Глубина колодца 8 м.

**4.** Знаменитый древнегреческий ученый Аристотель, взвешивая кожаный мешок без воздуха и с воздухом, обнаружил, что их вес одинаков. Объясните, почему Аристотель допустил ошибку.

**5.** Плотность льда примерно 920 кг/м$^3$, а плотность морской воды примерно 1000 кг/м$^3$. Высота выступающей из воды части айсберга 20 м. Какова общая высота айсберга? (Ответ: $H = 230$ м).

**6.** В сосуде с водой плавает большой кусок льда. Изменится ли уровень жидкости в сосуде после того, как лед растает?

**7.** Атмосферное давление 1000 гПа. Каким столбом воды можно уравновесить это давление? (Ответ: $h = 10$ м).

**8.** Стальную гирю массой 1 кг опускают на динамометре в воду. Каким будет показание динамометра? (Ответ: $P \approx 8{,}7$ Н).

**9.** Стальной якорь массой 300 кг сбросили в воду. Какую силу надо приложить для его подъема? (Ответ: $F \approx 2615$ Н).

**10.** Площадь поперечного сечения морского судна на уровне воды 3000 м$^2$. После погрузки на судно товаров его осадка увеличилась на 2 м. Определите массу груза, принятого судном. (Ответ: $m = 6 \cdot 10^6$ кг).

**11.** Вместимость оболочки воздушного шара равна 100 м$^3$. Оболочка наполнена гелием при атмосферном давлении. Подъемная сила шара 60 Н. Определите массу оболочки и гондолы. (Ответ: $m = 12$ кг).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ X

**1.** К покоящимся жидкостям и газам применимы законы сохранения, при этом рассматриваемый объем жидкости (или газа) можно представить как твердое тело (принцип отвердения).

**2.** Давлением называют скалярную физическую величину, характеризующую состояние жидкостей и газов. Давление равно отношению силы к площади основания, на которое эта сила действует:

$$p = \frac{F}{S}.$$

За единицу давления в Международной системе единиц принят паскаль (Па):

$$[p] = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{м}} = 1\ \text{Па}.$$

**3.** Давление в покоящихся жидкостях и газах зависит от высоты столба и плотности:

$$p = \rho g h.$$

**4.** Жидкости и газы, заключенные в замкнутый сосуд, передают производимое внешнее давление по всем направлениям одинаково (закон Паскаля).

**5.** Давление, производимое атмосферой на все, что есть на поверхности Земли, при обычных условиях ($t = 0°C$; на уровне океана) равно:

$$p_0 = 101325\ \text{Па} \approx 760\ \text{мм рт. ст.}$$

**6.** На тела, погруженные в неподвижную жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (или газа), направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема жидкости (или газа):

$$F = \rho g V.$$

# Глава XI. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ

## §49. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Знание законов сохранения даст возможность познакомиться с основными закономерностями движения жидкостей и газов, которое весьма распространено в природе и технике. Движется воздух в земной атмосфере, вода в океанах, морях, озерах и реках, нефть

*a* *b*

*Рис. 128*

и газ в трубопроводах; кровь в кровеносных сосудах; питательные соки в капиллярах растений и т.д.

Изучению движения жидкостей и газов посвящен специальный раздел механики — механика жидкостей и газов. Мы познакомимся лишь с наиболее важными явлениями.

**1. Ламинарное и турбулентное течения.** При небольших скоростях жидкость (и газ) течет как бы разделенной на слои, которые скользят друг относительно друга не перемешиваясь (рис. 128, *a*). Такое течение ● называют *ламинарным* (от латинского слова laminia — слой). Если в ламинарный поток воды опустить несколько кристалликов перманганата калия, то образовавшиеся от их растворения струйки подкрашенной воды, не размываясь, сохраняются на протяжении всего потока. Это свидетельствует о стационарности ламинарного течения.

При увеличении скорости характер течения жидкости изменяется (рис. 128, *b*). Слои жидкости начинают беспорядочно перемешиваться, возникают завих- ● рения. Такое течение называют *турбулентным* (от латинского слова turbulentus — вихревой). Турбулентное течение нестационарно.

Для простоты мы начнем изучение с ламирного движения жидкостей и газов по трубам.

**2. Скорость движения жидкости в трубе.** Допустим, что жидкость течет без трения по трубе переменного сечения (рис. 129). Если через поперечное сечение $S_1$ в трубу входит объем жидкости $V_1$, то, очевидно, что через сечение $S_2$ такой же объем $V_2 = V_1$ жидкости выходит, иначе поток жидкости где-то внутри трубы должен либо разорваться, либо сжаться. И то и другое невозможно. Сказанное справедливо для любого сечения трубы. Следовательно,

$$V_1 = V_2 = V_3 = ... = V_N.$$

Иначе говоря, через все сечения трубы проходят одинаковые объемы жидкости.


*Рис. 129*

Обозначим скорость течения жидкости в сечении $S_1$ через $v_1$, а в сечении $S_2$ — через $v_2$. Тогда объем жидкости, протекающей через сечение $S_1$ за время $t$, равен: $V_1 = S_1 l_1$, где $l_1$ — длина столбика жидкости, прошедшего через сечение $S_1$; но $l_1 = v_1 t$, поэтому $V_1 = S_1 v_1 t$.

Объем жидкости, протекающей через сечение $S_2$ за то же время $t$, равен:

$$V_2 = S_2 v_2 t.$$

Так как $V_1 = V_2$, то $S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$, или $S_1 v_1 = S_2 v_2$. Откуда следует, что $v_1 : v_2 = S_2 : S_1$, т.е. *скорость течения жидкости в трубе переменного сечения обратно пропорциональна площади поперечного сечения трубы.*

**3. Давление внутри движущейся жидкости.** Итак, при движении жидкости по трубе переменного сечения ее скорость изменяется. При переходе жидкости из широкой части трубы в узкую жидкость движется ускоренно, в результате ее скорость возрастает. Наоборот, при переходе из узкой части трубы в широкую жид-

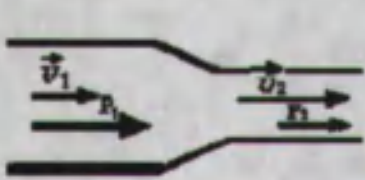


Рис. 130

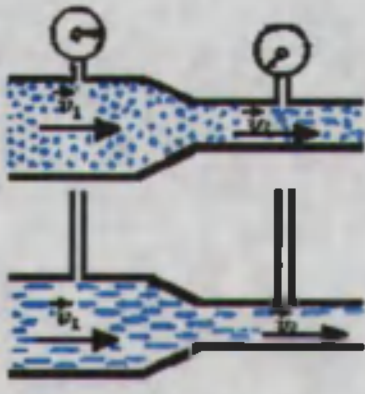


Рис. 131

кость движется замедленно. И в том, и другом случае жидкость движется с ускорением (рис. 130). Но ускорение вызывается силой. Какая же сила сообщает жидкости ускорение?

Этой силой может быть только разность сил давления жидкости в широкой и узкой частях трубы. Таким образом, давление жидкости в широкой части трубы должно быть больше, чем в узкой. Этот на первый взгляд парадоксальный вывод подтверждается прямыми опытами.

Рис. 132

Возьмем трубку переменного сечения и присоединим к ней манометр (рис. 131). При пропускании по трубке жидкости обнаружим, что давление жидкости больше в широкой части трубки и меньше в узкой части.

Иными словами, давление жидкости больше там, где скорость потока меньше, и меньше там, где скорость потока больше.

Продувая воздух между двумя изогнутыми листами жести (рис. 132), мы заметим, что они сближаются. Объяснение этому на первый взгляд парадоксальному факту простое: скорость движения воздуха между изогнутыми листами жести значительно больше, чем сбоку от них, а давление, наоборот, значительно меньше бокового давления, которое и сдвигает листы.

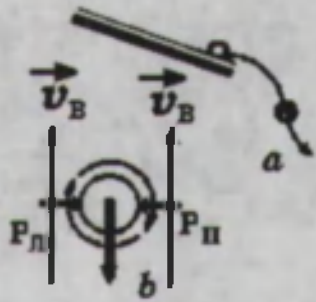


*Рис. 133*

Склеим из тонкой бумаги цилиндр и дадим ему возможность скатиться с наклонной плоскости. Скатившись, цилиндр движется не по параболе (рис. 133, *a*). Это явление называют *эффектом Магнуса* — по имени ученого, открывшего и исследовавшего его экспериментально.

Падение цилиндра происходит не по параболе, потому что, скатываясь с наклонной плоскости, он вращается вокруг своей оси и вовлекает во вращение прилегающие к нему слои воздуха (рис. 133, *b*). Движение воздуха, вызванное вращением цилиндра, справа от него происходит в направлении, противоположном движению воздуха, вызванному падением цилиндра, а слева — в том же направлении. Это приводит, в конечном счете, к тому, что скорость движения воздуха справа меньше, чем слева, а его давление $p_п$ на цилиндр справа больше давления $p_л$ слева, и цилиндр поэтому движется не по параболе.

Наше объяснение весьма правдоподобно, но его правильность надо проверить экспериментально.

Если бы нам удалось заставить цилиндр вращаться вокруг своей оси против часовой стрелки и одновременно двигаться слева направо, то, согласно сказанному, давление на цилиндр снизу было бы больше, чем сверху, и цилиндр должен был бы подняться (рис. 134, *a*).

Для проверки этого предположения намотаем на цилиндр ленту так, как показано на рисунке 134, *b*. Дернув резко палочку, прикрепленную к ленте в горизонтальном направлении, мы сообщим цилиндру и

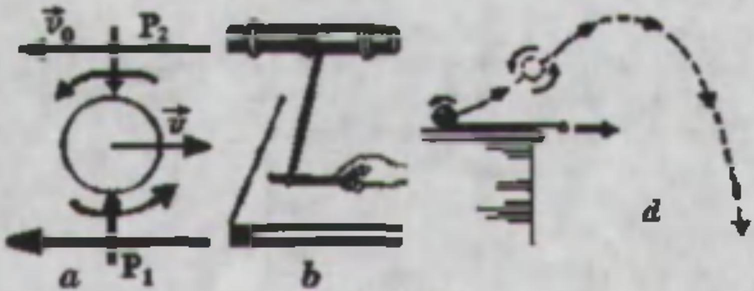



*Рис. 134*

вращение вокруг его оси, и движение вперед. Цилиндр при этом поднимается почти до потолка, а затем плавно опускается на пол (рис. 134, *d* ). Опыт подтверждает правильность данного нами объяснения.

В играх с мячом спортсмены широко используют так называемые "резаные" подачи мяча. Так, ударяя ногой по футбольному мячу сбоку, спортсмен заставляет мяч не только двигаться по выбранному им направлению, но и вращаться. Это приводит к тому, что мяч движется по сложной криволинейной траектории (рис. 135) и может обогнуть стоящих на его пути игроков. Такой удар в футболе иногда называют "сухой лист". Это название связано с тем, что у мяча, как и у падающего сухого листа, весьма сложная траектория движения.

?

1. Докажите, что скорость течения жидкости в трубе переменного сечения обратно пропорциональна площади поперечного сечения.

2. Объясните, почему давление газа больше там, где скорость потока меньше, и меньше там, где скорость потока больше.

3. Во время сильного ветра портативные зонтики довольно часто "вывертываются наизнанку" (рис. 136). Объясните, почему это происходит.

Рис. 135

Рис. 136

## §50*. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Закон сохранения и превращения энергии дает возможность найти количественную зависимость между скоростью течения жидкости и ее давлением. Впервые это соотношение было найдено академиком Петербургской Академии наук Даниилом Бернулли и носит его имя.

Допустим, что по горизонтально расположенной трубе переменного сечения движется без трения жидкость (рис. 137, *a*). Выделим в трубе объем жидкости, ограниченный сечениями $S_1$ и $S_2$. Пусть за время $\Delta t$ этот объем переместился вдоль трубы вправо и занял положение, ограниченное сечениями $S'_1$ и $S'_2$ (рис. 137, *b*).

Обратим внимание на то, что незаштрихованный объем жидкости, ограниченный сечениями $S'_1$ и $S'_2$, не изменил своего положения. Следовательно, энергия этого объема не изменилась. Изменилась лишь энергия заштрихованных объемов. Это изменение энергии произошло за счет работы внешних сил по проталкиванию жидкости в трубе.

При перемещении границы жидкости $S_1$ в положение $S'_1$ внешние силы совершают работу $A_1 = F_1 l_1$. Допустим, что время $\Delta t$ мало, тогда сечение $S'_1$ находится близко к сечению $S_1$ и $S'_1 \approx S_1$. В этом случае сила $F_1$ остается постоянной: $F_1 = p_1 \cdot S_1$, где $p_1$ — давление на жидкость в сечении $S_1$.

Работа внешней силы по проталкиванию жидкости через сечение $S_1$ равна:

$$A_1 = p_1 S_1 l_1.$$

Но произведение $S_1 l_1$ равно объему жидкости $V_1$, прошедшему через сечение $S_1$, поэтому $A_1 = p_1 V_1$. Объем $V_1$ можно выразить через массу жидкости в этом объеме и ее плотность:

$$V_1 = \frac{m}{\rho}.$$

Таким образом, $A_1 = p_1 \dfrac{m}{\rho} = \dfrac{p_1}{\rho} m$. Аналогично можно найти, что работа внешних сил по проталкиванию жидкости через сечение $S_2$ равна:

$$A_2 = \frac{p_2}{\rho} m.$$

Рис. 137

По закону превращения и сохранения энергии изменение полной механической энергии выделенного объема жидкости при переходе из положения $S_1S_2$ в положение $S'_1S'_2$ равно разности работ внешних сил:

$$\Delta W = A_1 - A_2.$$

Потенциальная энергия жидкости не менялась, так как труба расположена горизонтально; претерпела изменения лишь ее кинетическая энергия. Поэтому $A_1 - A_2 = W_{k2} - W_{k1}$.

$$\frac{p_1}{\rho} m - \frac{p_2}{\rho} m = \frac{m v_2^2}{2} - \frac{m v_1^2}{2}.$$

Сократим на $m$ и сгруппируем члены:

$$\boxed{p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2).}$$

Полученное соотношение представляет собой уравнение Бернулли. Из уравнения видно, что если $v_2 > v_1$, то $p_1 - p_2 > 0$ и $p_1 > p_2$, а если $v_2 < v_1$, $p_1 - p_2 < 0$ и $p_1 < p_2$. Уравнение Бернулли показывает, что *давление текущей жидкости (и газа) больше там, где скорость ее течения меньше, и наоборот, меньше там, где скорость ее течения больше* (рис. 137, *d*).

В основу вывода уравнения Бернулли мы положили закон сохранения энергии. Поэтому это уравнение следует рассматривать как следствие из закона сохранения энергии.

?

**1.** Выведите уравнение Бернулли.

**2.** Приведите факты, подтверждающие справедливость уравнения Бернулли.

**3.** Объясните физические основы "резаного" удара футболистов.

**4.** В 1984 г. по заказу французского ученого И. Кусто было построено судно, на палубе которого установлен вертикально большой цилиндр с небольшими лопастями (рис. 138), приводимый во вращение вокруг вертикальной оси небольшим двигателем. Не имея винта, судно может двигаться по ветру и против ветра. Объясните принцип движения этого судна, названного ветроходом.

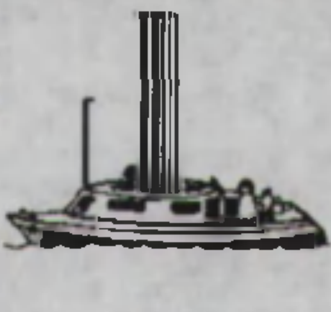


*Рис. 138*

## §51. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ В ДВИЖУЩИХСЯ ГАЗАХ И ЖИДКОСТЯХ ОТ СКОРОСТИ

Зависимость давления движущихся жидкостей и газов от скорости их движения широко используют в бытовых и промышленных установках. Рассмотрим несколько примеров.

**1. Пульверизатор.** Пульверизатор знаком каждому. На рис. 139 приведена его схема. Скорость движения воздуха в стакане (или флаконе с одеколоном) практически равна нулю, а давление равно атмосферному. Скорость воздуха, подаваемого воздуходувкой (грушей) в горизонтальную трубку, велика, а давление в ней, и следовательно, над трубочкой, опущенной в жидкость, очень мало. Под действием атмосферного давления

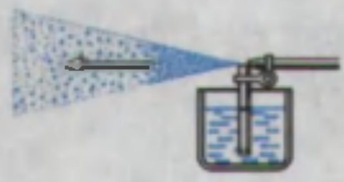


*Рис. 139*


*Рис. 140*

жидкость поднимается по трубочке вверх и разбрызгивается струей воздуха.

**2. Газовая горелка.** Для сгорания газа необходим кислород. Кислород содержится в воздухе (около 23% по массе). Поэтому газ перед сжиганием смешивается с воздухом. Процесс смешивания газа с воздухом происходит в газовой горелке. На рис. 140 показано устройство лабораторной газовой горелки.

Газ, поступая из трубы газовой магистрали, движется по трубке газовой горелки с большой скоростью. Его давление в трубке меньше, чем давление окружающего воздуха. Поэтому воздух засасывается через отверстия в трубку и по пути смешивается с газом.

Образовавшаяся смесь сгорает факелом над трубкой газовой горелки. Регулируя отверстие, можно найти оптимальное сочетание газа и воздуха (кислорода).

**3. Карбюратор.** В двигателях внутреннего сгорания, работающих на легком жидком топливе (бензин, керосин и др.), смешивание топлива с воздухом происходит в специальном приборе — карбюраторе (от французского слова carburateur — вводить, смешивать).

На рис. 141, *a* показана предельно упрощенная схема карбюратора. Засасываемый в цилиндр очищенный от пыли воздух проходит через диффузор 1, в стенке которого есть трубка 2, соединенная с так называемой поплавковой камерой 3, где на постоянном уровне находится горючее.

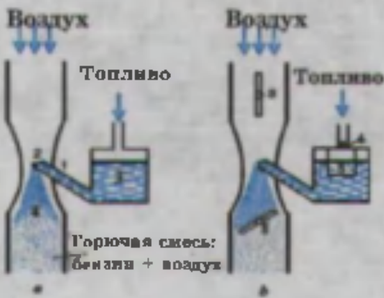


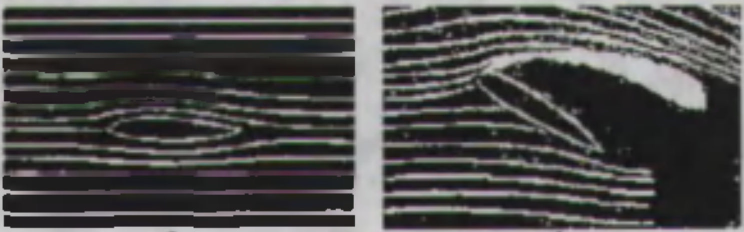

*Рис. 141*

Воздух в диффузоре движется с большой скоростью, поэтому его давление меньше атмосферного. Вследствие этого происходит засасывание в смесительную камеру 4 топлива из трубки 2. Топливо при этом распыляется (как в пульверизаторе), перемешивается с воздухом и частично испаряется. Образовавшаяся смесь поступает в цилиндры двигателя.

Для тех, кто интересуется устройством автомобилей, на рис. 141, *b* показана более полная (но также упрощенная) схема карбюратора. Воздушная заслонка 5 дает возможность регулировать количество поступающего воздуха (и тем самым концентрацию топлива в горючей смеси). Дроссельная заслонка 6 регулирует количество смеси, поступающей в цилиндры. Поплавок регулирует поступление топлива в поплавковую камеру, поддерживая его уровень постоянным. Отверстие соединяет поплавковую камеру с атмосферой.

**4. Подъемная сила крыла самолета.** Уравнение Бернулли, являющееся частным случаем закона сохранения энергии, дает возможность объяснить, почему поднимаются в воздух и летают тяжелые самолеты.

Крыло самолета в сечении имеет несимметричную форму, показанную на рис. 142, *a*. При движении самолета воздушный поток обтекает крыло (рис. 142, *b*) так, что давление воздуха на крыло сверху меньше, чем снизу. Благодаря этому возникает сила, которая и поднимает самолет в воздух. В справедливости сказанного можно убедиться на сравнительно простых опытах.



*a* *b*

*Рис. 142*

Возьмем модель крыла самолета, в верхней и нижней поверхностях которого сделаны отверстия для измерения давления. Эти отверстия соединим с чувствительным манометром (рис. 143). Столбики жидкости в правом и левом коленах манометра находятся на одном уровне.

Направив на модель крыла горизонтальный поток воздуха от вентилятора (это равносильно движению крыла вперед), мы заметим, что уровень столбиков в манометре изменился: опустился в колене, соединенном с нижним отверстием, и поднялся в колене, соединенном с верхним отверстием. Результаты опыта подтверждают правильность сказанного выше о причине, вызывающей подъем крыла самолета: *давление над крылом меньше, чем под ним.*

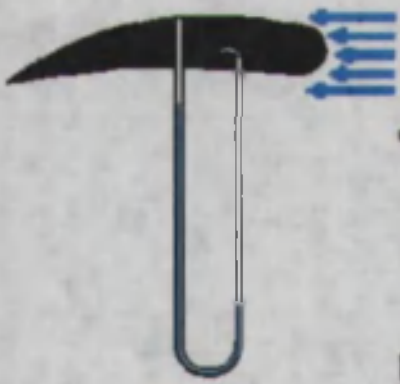


*Рис. 143*

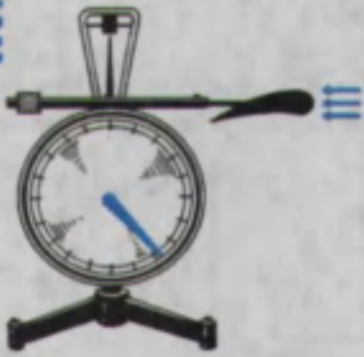


*Рис. 144*

Уравновесим модель крыла самолета на весах (рис. 144). Направив на нее горизонтальный поток воздуха от вентилятора, мы увидим, что равновесие весов нарушается: плечо рычага, на котором установлена модель, поднимается вверх. Опыт подтверждает возникновение подъемной силы у крыла самолета.

Теорию подъемной силы крыла самолета разработал русский ученый Николай Егорович Ж у к о в с к и й.

?

1. Объясните принцип работы пульверизатора.
2. Объясните устройство и работу газовой горелки.
3. Объясните устройство и работу карбюратора.
4. Объясните, как возникает подъемная сила у крыла самолета.

### *Упражнение 11*

**1.** Возьмите пылесос и присоедините шланг к его выходному отверстию. Включив пылесос, поставьте шланг вертикально и внесите в струю выходящего воздуха мяч от настольного тенниса. Мяч "висит" в струе. Объясните наблюдаемый эффект.

**2.** В полете давление под крылом самолета $9,78 \cdot 10^4$ Н/м$^2$, а над крылом - $9,67 \cdot 10^4$ Н/м$^2$. Площадь крыльев 40 м$^2$.

Определите подъемную силу, если угол атаки 0°. (*Ответ*: $F = 4{,}4 \cdot 10^4$ Н).

**3.** Разность давлений над и под крылом модели самолета 20 мм водяного столба. Какова подъемная сила крыла модели, если площадь крыла 30 см$^2$?

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВЫ XI

**1.** К движению жидкостей и газов можно применять законы Ньютона и законы сохранения, если учитывать специфические свойства жидкостей и газов.

**2.** Стационарным потоком жидкости (или газа) называют такое движение жидкости (или газа), при котором скорость движения их частиц в данном месте потока остается постоянной (стационарной).

**3.** Линиями тока в стационарном потоке называют траектории движения частиц жидкости (или газа).

**4.** Давление внутри движущейся жидкости (или газа) зависит от скорости их движения: в той части потока, где скорость движения большая, давление мало и, наоборот, в той части потока, где скорость мала, давление большое.

**5.** Зависимость давления в жидкостях и газах от скорости широко используется в технике (крыло самолета, карбюратор, газовая горелка и др.).

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

*Колебательное движение — одно из самых распространенных* движений в природе и технике. Почти невозможно назвать такую область, в которой не встречались бы колебания. Колеблются деревья в лесу, пшеница в поле, трава на лугу. Колеблются струны музыкальных инструментов, мембрана телефона, диффузор громкоговорителя, фундаменты машин, трубопроводы, плоскости самолета, корпус ракеты, поршень двигателя внутреннего сгорания и т.д.

Колебательные движения происходят и в жизни нашей планеты (землетрясения, приливы и отливы), и в астрономических явлениях (например, пульсирует Солнце, совершая одно колебание за 160 мин).

С колебаниями мы встречаемся и в жизни нашего организма. Биение сердца, движение голосовых связок — все это примеры *колебательного движения*.

Колебания играют огромную роль в жизни человека. Без знания законов колебаний нельзя было бы создать радио, телевидение, многие современные устройства и

*Рис. 145*

машины. Колебания многогранны. Иногда они выступают как друг и помощник человека, а иногда как коварный враг. На рис. 145 показано разрушение моста через реку Токома Нерроус (США) под действием колебаний, вызванных ветром. Неучтенные колебания могут привести к разрушению сложных технических сооружений и вызвать серьезные заболевания человека. Все это говорит о необходимости их всестороннего изучения. Для их изучения применяются законы, с которыми вы познакомились в предыдущих разделах.

# Глава XII. КОЛЕБАНИЯ

## §52. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОЛЕБАНИЯХ

**1. Колебательные системы.** На рис. 146 приведены примеры механических устройств, совершающих колебания. Легко заметить, что колеблющееся тело всегда связано с другими телами и вместе с ними образует систему тел, которая получила название колебательной системы. Земля, штатив, пружина и груз образуют вертикальный пружинный маятник (рис. 146, *а*). (Земля на рисунке не показана). Земля, подставка и подвешенный на легкой и прочной нити к подставке шарик ● образуют колебательную систему, называемую *физическим маятником* или просто *маятником* (рис. 146, *b*). Два штатива, две пружины и тело массой $m$ обра-

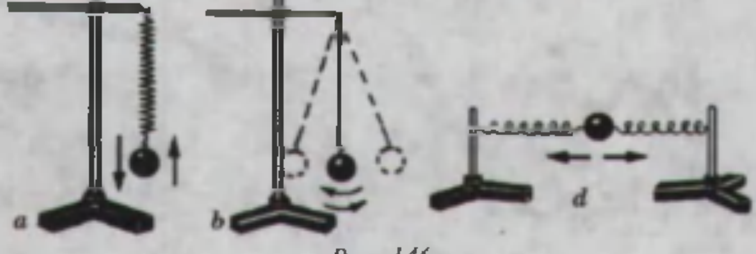



*Рис. 146*

зуют колебательную систему, которую обычно называют горизонтальным *пружинным маятником* (рис. 146, *d*).

Всем колебательным системам присущ ряд общих свойств. Рассмотрим главные из них:

а) у каждой колебательной системы есть состояние устойчивого равновесия. У физического маятника — это положение, в котором центр масс подвешенного шарика находится на одной вертикали с точкой подвеса; у вертикального пружинного маятника — положение, в котором сила тяжести уравновешивается силой упругости пружины; у горизонтального пружинного маятника — положение, при котором обе пружины деформированы одинаково;

б) после того, как колебательная система выведена из положения устойчивого равновесия, появляется сила, возвращающая систему в устойчивое положение. Происхождение этой силы может быть различным. Например, у физического маятника — это равнодействующая $R$ силы тяжести $Q$ и сила реакции нити $N$ (рис. 147), а у пружинных маятников — сила упругости пружин;

в) возвратившись в устойчивое состояние, колеблющееся тело не может сразу остановиться. Этому мешает его инертность.

Перечисленные свойства приводят к тому, что если колебательную систему тем или иным способом вывести из состояния устойчивого равновесия, то в ней в отсутствие внешних сил возникнут и некоторое время будут сохраняться колебания.

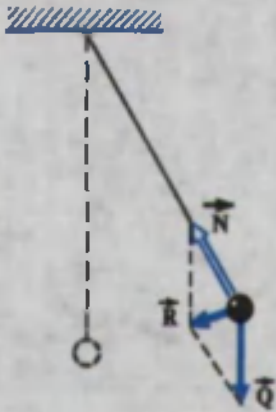


Рис. 147

**2. Свободные колебания.** Колебания, возникающие в колебательной системе, не подвергающейся переменным внешним воздействиям, вследствие какого-либо отклонения этой системы от состояния устойчивого равновесия называют *свободными* (или *собственными) колебаниями*.

Примером свободных колебаний могут служить колебания маятника зажатой в тисках пружины (рис. 148), колебания груза, подвешенного на пружине, колебания струны после того, как ее выведут из положения равновесия и предоставят самой себе.

**3. Осциллограмма колебаний.** Если полость маятника наполнить чернилами, то при колебаниях маятника вытекающие из него чернила вычертят на равномерно движущейся относительно точки подвеса маятника бумажной ленте кривую (рис. 149). Так как бумажная лента двигалась равномерно, то полученная кривая показывает, как с течением времени изменялось положение маятника относительно положения равновесия, т.е. зависимость смещения маятника от времени. Такие кривые называются осциллограммами.

● *Слово "осциллограмма" происходит от латинского слова oscillum — колебание и греческого слова "графио" — пишу.*

?
1. Какие колебания называют свободными?
2. Назовите основные свойства колебательной системы.

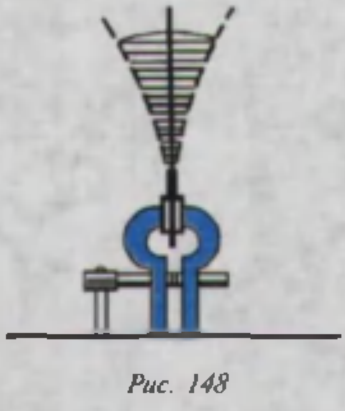


*Рис. 148*

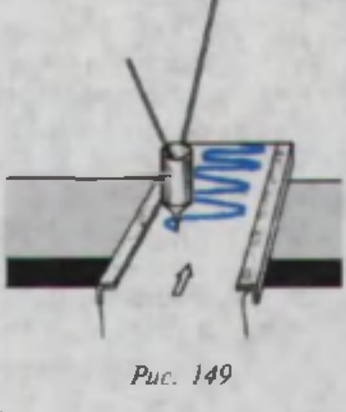


*Рис. 149*

## §53. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВЕЛИЧИНЫ, ИХ ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ

В природе и технике существует множество самых разнообразных колебаний. Изучить все многообразие колебаний невозможно. Упростим свою задачу и представим себе идеальный маятник, состоящий из небольшого тела массой $m$, подвешенного на невесомой прочной нити, длина которой значительно больше размеров тела, так что тело можно принять за материальную точку. Допустим также, что маятник при колебаниях не испытывает ни сил трения, ни сил сопротивления воздуха. Такой маятник получил название *математического*. Конечно, реально математических маятников не существует. Но можно создать его модель. Например, грубой моделью математического маятника может служить свинцовый или стальной шарик, подвешенный на длинной, очень легкой и тонкой, но прочной нити.

Если бы у нас был воображаемый математический маятник, то, выведя его из положения равновесия, мы обнаружили бы, что:

а) колебания маятника продолжаются бесконечно (так как нет необратимых преобразований энергии);

б) его максимальное отклонение вправо от положения равновесия равно максимальному отклонению влево;

в) время отклонения вправо равно времени отклонения влево;

г) характер движения вправо и влево от положения равновесия одинаков.

Такие колебания называют *гармоническими* (от греческого слова "гармония" — согласование).

**1. Величины, характеризующие гармонические колебания.** Для описания колебаний, кроме перемещения, скорости и ускорения, введены специальные для этого вида движения величины. Одной из таких величин является смещение.

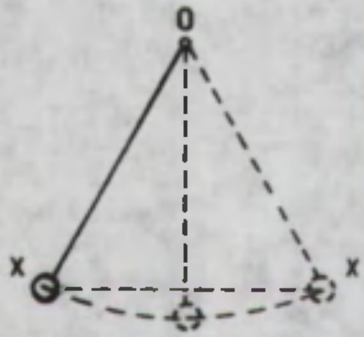



Рис. 150

***Смещением называют проекцию перемещения колеблющегося тела от его положения равновесия на ось*** *OX* (рис. 150). Смещение — величина скалярная.

При колебательном движении значение смещения непрерывно изменяется. Максимальное значение смещения называют *амплитудным* или *амплитудой*. Амплитуду обозначают буквой $X_m$, а смещение в любой момент времени — $x$.

***Промежуток времени, за который колебательная система совершит одно полное колебание***[1]***, называют периодом.*** Период обозначают буквой $T$.

Если за время $t$ произошло $N$ полных колебаний, то период колебаний определяется формулой:

$$\boxed{T = \frac{t}{N}.}$$

Число колебаний, совершаемых телом в 1 с, называют *частотой* колебаний. Частоту колебаний обычно обозначают буквой $\nu$. Если за время $t$ совершается $N$ полных колебаний, то:

$$\boxed{\nu = \frac{N}{t}.}$$

***Частотой называют число полных колебаний, совершающихся в 1 с.*** За единицу частоты принимают частоту, при которой в 1 с совершается одно колебание. Эту единицу частоты называют герц (Гц). Назва-

[1] Полным колебанием называют колебание, в результате которого колебательная система придет в исходное состояние, пройдя расстояние, равное четырем амплитудам.

ние единице частоты дано в честь немецкого физика Генриха Герца. На практике для измерения частоты используют кратные единицы: килогерц (кГц), мегагерц (МГц) и гигагерц (гГц).

Сравнение формул для периода и частоты показывает, что период и частота — величины взаимно обратные.

1. Какие колебания называют гармоническими?
2. Как изменяется смещение колеблющегося тела при гармонических колебаниях?
3. Напишите формулы периода и частоты.
4. Составьте план рассказа о возвращающей силе.

## §54. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

**1. Превращения энергии при свободных колебаниях.** Отведем маятник на небольшой угол $\alpha$ от положения устойчивого равновесия (рис. 151)[1]. Этим мы сообщим маятнику дополнительную потенциальную энергию:

$$W_p = mgH_{max},$$

где $H_{max}$ — максимальная высота подъема маятника.

Отпустим маятник. Под действием силы тяжести и силы реакции нити маятник будет двигаться к положению равновесия. При этом его потенциальная энергия превращается в кинетическую. В положении равновесия вся сообщенная маятнику потенциальная энергия превратится в кинетическую:

$$W_k = \frac{mv^2_{max}}{2},$$

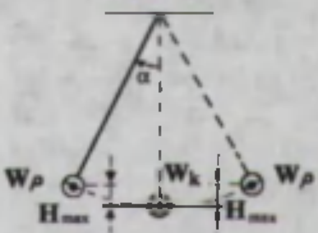


*Рис. 151*

[1]На рис. 151 этот угол для наглядности показан большим. В действительности этот угол должен быть меньше 5°: для больших углов приведенные рассуждения не справедливы.

где $v_{max}$ — максимальное значение скорости движения тела, подвешенного к нити. Дойдя до крайнего левого положения, маятник начнет двигаться в обратном направлении.

При отсутствии сил трения, по закону сохранения энергии, максимальное значение потенциальной энергии равно максимальному значению кинетической энергии:

$$mgH_{max} = \frac{mv^2_{max}}{2}.$$

Итак, при колебаниях маятника происходит периодическое превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно:

$$W_p \to W_k \to W_p \to W_k \to W_p \to \dots .$$

В произвольный момент полная механическая энергия колеблющегося тела, по закону превращения и сохранения энергии, равна сумме его потенциальной и *кинетической энергии*:

$$E = W_k + W_p.$$

Отведем маятник от положения равновесия и предоставим возможность ему совершать свободные колебания. Наблюдения показывают, что амплитуда колебания постепенно уменьшается. Колебания затухают.

Это происходит потому, что сообщенная в начальный момент маятнику энергия преобразуется во внутреннюю энергию и рассеивается в окружающее пространство. Если бы не было трения, энергия колебательной системы оставалась бы постоянной и колебания продолжались бы бесконечно.

**2. Кинетическая энергия маятника.** В процессе колебания кинетическая энергия маятника непрерывно изменяется, и ее можно подсчитать по формуле:

$W_k = \frac{mv^2}{2}$. В этой формуле $v$ — значение скорости в тот момент (в той точке), в которой мы хотим подсчитать кинстическую энергию.

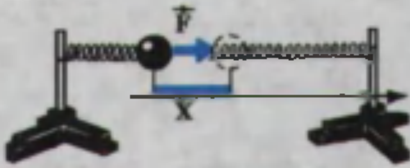


*Рис. 152*

Максимальной кинетической энергией маятник обладает в момент прохождения положения равновесия. В этот момент его скорость имеет максимальное значение $v_{max}$. Поэтому:

$$W_{k\,max} = \frac{mv^2_{max}}{2}.$$

**3. Потенциальная энергия маятника.** Определим потенциальную энергию пружинного маятника в произвольный момент времени (в произвольной точке). Допустим, что маятник отклонился от положения равновесия на расстояние $x$ (рис. 152). На маятник действует возвращаюшая сила:

$$F = -kx.$$

Эта сила при возвращении маятника в положение равновесия изменится от $kx$ до 0. Совершенная ею работа:

$$A = F_{ср}x$$

равна потенциальной энергии маятника в рассматриваемой точке. Так как сила изменяется от 0 до $x$ линейно, то ее среднее значение $F_{ср} = \frac{kx}{2}$, а совершенная работа $A = \frac{kx}{2}x = \frac{kx^2}{2}$. Таким образом, мгновенное значение потенциальной энергии колебаний пропорционально квадрату смещения:

$$W_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Максимальной потенциальной энергией маятник обладает в крайних положениях, когда его смещение максимально:

$$W_{p\,max} = \frac{kX_m^2}{2}.$$

?

1. Расскажите о преобразованиях энергии при колебаниях маятника.
2. Какое из написанных ниже соотношений справедливо:

$$E = \frac{mv_m^2}{2};\ E = \frac{kX_m^2}{2};\ E = mgH_m\ ?$$

3*. Докажите, что потенциальная энергия математического маятника:

$$W_p = \frac{\frac{mg}{l}x}{2}.$$

## § 55. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКА

**1. Опыты и наблюдения.** Выясним, от чего и как зависит период колебаний маятника, близкого по своим свойствам к математическому маятнику.

Для этого подвесим свинцовый (или стальной) шарик на длинной легкой нити. Отведя маятник на небольшое расстояние от положения равновесия, отпустим его и определим период колебаний. Спустя некоторое время, когда амплитуда колебаний маятника заметно уменьшится, вновь определим период его колебаний. Оказывается, что период колебаний остался прежним.

Таким образом, опыт свидетельствует, что период колебаний маятника, близкого по своим свойствам к математическому, при малых амплитудах колебаний не зависит от амплитуды. Это свойство маятника называют *изохронизмом* ("изо" - постоянный, "хронос" — время).

Не меняя длину маятника, заменим свинцовый шарик таким же по объему шариком из пластмассы, масса которого значительно меньше массы свинцового шарика, и вновь повторим опыт. Период колебаний оказался таким же, как и в случае свинцового шарика. Опыт можно повторить с шариками из других материалов, результат будет одним и тем же. Следовательно,

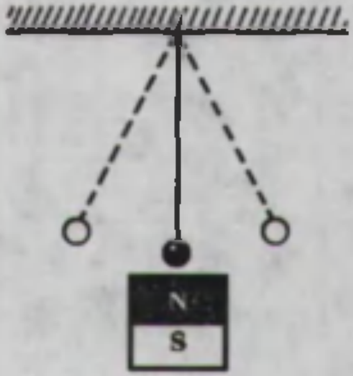


*Рис. 153*

***период колебаний маятника, близкого по своим свойствам к математическому маятнику, не зависит от массы маятника.***

Изменяя длину маятника, легко заметить, что чем короче маятник, тем меньше период его колебаний, и, наоборот, чем длиннее маятник, тем больше период его колебаний.

Подставив под маятник со стальным шариком сильный магнит (рис. 153), заметим, что период колебаний маятника уменьшился. Поднесение магнита равносильно увеличению земного притяжения.

Поэтому можно высказать предположение, что период колебаний маятника зависит от ускорения свободного падения.

**2. Вывод формулы периода колебаний.** Проведенные опыты позволили установить, что период колебаний маятника не зависит от его массы и амплитуды (при малых амплитудах), а зависит от его длины и ускорения свободного падения. Но мы не знаем характера этих зависимостей.

Для выяснения характера зависимости периода колебаний маятника от его длины и ускорения свободного падения проделаем два простых опыта. Заставив маятник колебаться, определим период его колебаний $T$.

*Рис. 154*

Остановим маятник и заставим его описывать коническую поверхность (рис. 154). В этом случае шарик маятника будет двигаться по окружности. Определив период обращения маятника, обнаружим, что он равен периоду колебаний этого маятника:

$$T_{об} = T_{кол} = T.$$

Период обращения конического маятника легко вычислить — он равен длине описываемой шариком окружности, деленной на линейную скорость:

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

Так как шарик движется по окружности, то на него действует центростремительная сила $F = \frac{mv^2}{R}$, откуда $v = \sqrt{\frac{FR}{m}}$. Центростремительная сила может быть найдена геометрическим способом — в треугольниках $OBC$ и $BDE$ схожие стороны пропорциональны: $BE:ED = OB:OC$, $OC \approx CB = l$, или $F:mg = R:l$, откуда $F = \frac{mgR}{l}$. Подставив значение центростремительной силы в формулу линейной скорости, получим $v = R\sqrt{\frac{g}{l}}$.

А подставив значение линейной скорости в формулу периода, найдем, что:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}\,.$$

Итак, период колебаний математического маятника зависит только от длины маятника $l$ и от ускорения свободного падения $g$.

**3. Пример решения задачи.** Маятник состоит из стального шара диаметром 4 см, подвешенного на легкой нити длиной 98 см. Определите ускорение свободного падения, если период колебания маятника 2 с.

**Анализ условия.** Для решения задачи можно воспользоваться формулой периода колебаний маятника, в которой нам неизвестна длина маятника. Так как центр массы маятника находится ниже точки подвеса маятника на $D/2$, то длина маятника $l$ = 100 см.

**Решение:** Из формулы периода колебаний маятника находим:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

**Вычисления.**

| | |
|---|---|
| $T = 2$ с | |
| $l = 100$ см | $g = \dfrac{4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 100\ \text{см}}{4\ \text{с}^2} \approx 986\ \text{см/с}^2.$ |
| $g = ?$ | **Ответ:** $g \approx 986$ см/с$^2$. |

?

1. Что такое изохронизм колебаний?
2. Зависит ли период колебаний маятника от его массы?
3. Выведите формулу периода колебаний математического маятника.
4*. Период колебаний пружинного маятника ученик определил так: $T = 4t$, где $t$ – время, затрачиваемое маятником на прохождение расстояния от положения устойчивого равновесия до крайнего положения. Очевидно, что: $t = \dfrac{X_m}{v_{ср}}$. Средняя скорость движения на участке от положения равновесия до крайнего положения (или, наоборот, от крайнего положения до положения равновесия) равна:

$$v_{ср} = \frac{v_m}{2}. \text{ Поэтому } t = \frac{2X_m}{v_m}, \text{ а } T = \frac{8X_m}{v_m}.$$

Из равенства максимальных значений потенциальной и кинетической энергий колебательной системы $\frac{kX_m^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}$ следует, что:

$$v_m = X_m \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Подставив значение максимальной скорости в формулу периода, получим:

$$T = 8 \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Сравним ее с точной формулой периода колебаний пружинного маятника:

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

Где и какую ошибку допустил ученик при выводе?

## § 56. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

### *Лабораторная работа № 7*

Вы знаете, что ускорение свободного падения характеризует гравитационное поле Земли. Земля неоднородна. Поэтому ускорение свободного падения в каждой точке земной поверхности можно определить только экспериментально. Один из способов основан на знании формулы периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ откуда } g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Из последней формулы видно, что для определения ускорения свободного падения необходимо знать длину маятника и период его колебания. Длину маятника можно измерить непосредственно. Для этого необходимо иметь лишь мерную ленту. Период колебания можно вычислить по формуле:

$$T = \frac{t}{N},$$

где $N$ — число колебаний за время $t$.

Оценим возможные погрешности этого способа определения ускорения свободного падения. Так как $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$, то относительная погрешность равна:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} = 2\frac{\Delta T}{T}.$$

Длину маятника с помощью ленты можно измерить с абсолютной погрешностью ± 5мм.

В условиях школьной лаборатории длина маятника может быть порядка 1 — 2 м. Если $l$ = 1 м, то

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{500 \text{ мм}}{1000 \text{ мм}} = 0{,}005.$$

Это обеспечивает достаточно высокую точность измерения. Сложнее измерить период колебаний. При длине маятника 1 м период колебаний равен примерно 2 с, а абсолютная погрешность секундомера наручных часов примерно ± 1 с:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1 \text{ с}}{2 \text{ с}} = 0{,}5.$$

Следовательно, точность определения ускорения, в основном, зависит от точности измерения периода колебаний.

Точность измерения периода колебаний можно повысить, если измерить время не одного колебания, а, например, 20 полных колебаний. В этом случае погрешность измерения времени будет в 20 раз меньше:

$$T = \frac{t}{N}.$$

Поэтому

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta t}{t}; \quad \frac{\Delta T}{T} = \frac{0{,}5}{20} = 0{,}025.$$

**Порядок выполнения работы**

1. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца с помощью муфты укрепите кольцо и подвесьте к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 1 – 2 см от пола.

2. Отклонив шарик в сторону на 5 – 8 см, отпустите его.

3. Заметьте время 20 – 30 полных колебаний и определите период.

4. Измерьте длину маятника.

5. Вычислите ускорение свободного падения по формуле.

6. Вычислите погрешность, с которой вы определили ускорение.

## §57. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

***Вынужденными называют колебания, возникающие в колебательной системе под действием периодически изменяющейся внешней силы.***

**1. Примеры вынужденных колебаний.** У вас в квартире задребезжали стекла, когда мимо дома проезжал тяжелый грузовик. Колебания стекол — вынужденные. Их вызвали колебания почвы и воздуха, созданные проезжавшим грузовиком.

Вы говорите по телефону. Мембрана микрофона колеблется под действием колебаний воздуха, а воздух —

под действием колебаний голосовых связок. Колебания мембраны микрофона и колебания воздуха — вынужденные.

Корпуса всех работающих машин и механизмов также совершают вынужденные колебания. Вынужденные колебания совершает диффузор громкоговорителя.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что вынужденные колебания весьма часто встречаются в окружающем нас мире, поэтому надо знать их основные свойства.

**2. Частота вынужденных колебаний.** Если на конец пружины пружинного маятника плавно действовать с малой частотой, то и груз маятника колеблется с малой частотой. Если увеличить частоту вынуждающих колебаний, то увеличится и частота вынужденных колебаний. Чем больше частота вынуждающих колебаний, тем больше и частота вынужденных колебаний. Эти и другие аналогичные опыты убеждают в том, что частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающих колебаний.

?

1. Какие колебания называют вынужденными?
2. Приведите примеры вынужденных колебаний.
3. Чему равна частота вынужденных колебаний?

## §58. ЯВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСА

**1. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от амплитуды вынуждающих колебаний.** Присоединим левый конец пружины маятника почти к центру диска, надетого на ось двигателя (рис. 155,*a*). Включив двигатель, заметим, что маятник колеблется с малой амплитудой.

Присоединим конец пружины маятника к самому краю диска (рис. 155, *b*) и повторим опыт. Обнаружим, что маятник колеблется с большей амплитудой.

Следовательно, опыт свидетельствует о том, что при одной и той же частоте колебаний *амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды вынуждающих колебаний:* чем больше амплитуда вы-

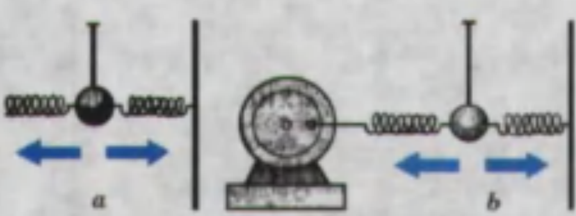



Рис. 155

нуждающих колебаний, тем больше амплитуда вынужденных колебаний.

**2. Резонанс.** Продолжим изучение вынужденных колебаний. Выясним, а не зависит ли амплитуда вынужденных колебаний от частоты вынуждающих колебаний. Для этого соберем установку, изображенную на рис. 155. Включив двигатель, заметим, что маятник колеблется с небольшой амплитудой.

Медленно увеличивая частоту вынуждающих колебаний, заметим, что частота вынужденных колебаний маятника увеличивается и достигает очень большого значения. Однако, при дальнейшем росте частоты вынуждающих колебаний амплитуда вынужденных колебаний маятника уменьшается!

На рис. 156 приведен график, иллюстрирующий результаты опыта, аналогичного проведенному.

Чтобы понять то, что мы видели в ходе опыта, повторим его и в момент, когда амплитуда вынужденных колебаний достигнет наибольшего значения, определим частоту.

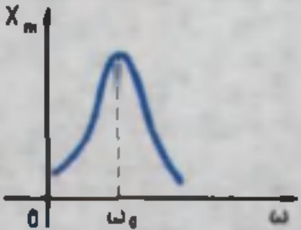



Рис. 156

Выключив двигатель и остановив маятник, определим частоту свободных колебаний маятника. Вас ждет неожиданность: частота свободных колебаний маятника и частота, при которой амплитуда его вынужденных колебаний была наибольшей, примерно одинаковы!

***Резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающих ко-***

*лебаний к частоте свободных колебаний называют резонансом.*

1. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний?
2. Какое явление называют резонансом?
3. Когда наступает явление резонанса?

## §59*. УЧЕТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ТЕХНИКЕ

Жилые дома и промышленные корпуса, железные дороги и самолеты, морские суда и автомобили, космические корабли и ракеты, гидравлические турбины и двигатели внутреннего сгорания, мосты и тоннели являются колебательными системами, в которых при определенных условиях могут возникать вынужденные колебания. Иногда амплитуда вынужденных колебаний становится столь большой, что сооружение может разрушиться. Это заставляет учитывать возможность резонанса в сооружениях. В ряде случаев явление резонанса может быть использовано и для достижения определенного положительного эффекта.

**1. Примеры использования резонанса.** Явление резонанса находит широкое применение в технике. Так, для уплотнения сыпучего основания под фундаменты и дороги, а также для уплотнения бетона используют специальные вибраторы-уплотнители. Существует большое число конструкций вибраторов, но основная часть каждого из них — прочное основание, на котором установлен двигатель с неуравновешенным маховиком или системой неуравновешенных грузов (рис. 157). При работе двигателя насаженные на его ось грузы (или маховик) вызывают колебания всей установки. Для получения больших амплитуд собственную частоту колебаний уплотнителя делают равной частоте вибрации вала двигателя. Колебания виброуплотнителя передаются через площадку грунту или бетону.

Вибраторы, аналогичные описанному, применяют для вибрационного погружения свай, шпунтов, труб и т.п. Для вибрационного погружения сваи мощный вибратор устанавливают на ее верхнем основании. При включении двигателя свая начинает вибрировать; грунт под сваей "разжижается", и под действием силы тяжести она погружается. Этот метод погружения применяется на строительстве морских и озерных сооружений.

Явление резонанса используют для измерения частоты колебаний. Располагая набором резонаторов (колебательных систем с малым затуханием), частоты которых заранее известны, можно определить частоту происходящих колебаний. Частота эта равна частоте наиболее сильно колеблющегося резонатора.

Этот принцип используют, например, в язычковом частотомере, который представляет комплект упругих пластин, имеющих разную частоту свободных колебаний (рис. 158).

Каждая такая пластина, будучи закреплена одним концом в массивной обойме, является колебательной системой, собственная частота которой определяется массой и упругостью пластины.

При колебании пластины ее торцовая часть видна в виде размытой полоски. Измеряемая частота совпадает с частотой колебаний той из пластин, амплитуда колебаний которой наибольшая.

**2. Примеры опасных резонансных колебаний в механических системах.** Электрические двигатели, паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сго-


*Рис. 157*

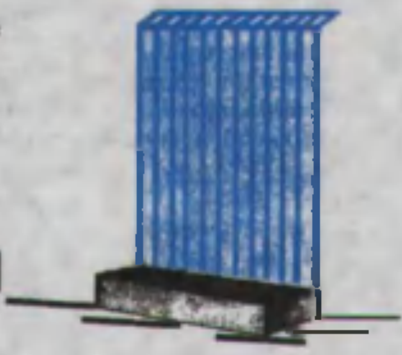


*Рис. 158*

рания даже из-за небольшой несбалансированности вращающихся масс являются источником колебаний, передающихся основаниям, на которых они установлены. Если двигатель жестко укреплен на фундаменте, колебания почти полностью передаются грунту и через грунт зданию, в котором машина установлена.

Если колебательная система обладает малым трением, то лишь небольшая часть подводимой к ней энергии превращается во внутреннюю энергию системы. В этих условиях (при совпадении частоты вынуждающих колебаний с частотой свободных колебаний) амплитуда вынужденных колебаний может достичь больших значений и вызвать разрушение здания.

Известно много случаев, когда источником опасных колебаний механических сооружений были люди, идущие в ногу. Например, в 1831 г. в Манчестере по мосту через р. Ирвель проходили строем, шагая в ногу, 60 солдат. Частота ударов солдатских ног совпадала с частотой свободных колебаний моста, и мост разрушился. Аналогичный случай произошел в 1905 г. в Петербурге, *кода был разрушен цепной мост через реку* Фонтанку в результате прохождения по нему эскадрона гвардейской кавалерии. Частота ударов ног хорошо обученных лошадей совпала с частотой свободных колебаний моста. Цепи, на которых висел мост, разорвались, мост обрушился.

**3. Гашение нежелательных вынужденных колебаний.** То обстоятельство, что амплитуда вынужденных колебаний может достичь опасных для конструкций значений, заставило искать способы гашения вынужденных колебаний.

Один способ гашения вынужденных колебаний состоит в таком изменении частоты свободных колебаний системы, чтобы она не совпадала с частотой вынуждающих колебаний и не была ей кратна. Например, при изготовлении паровой турбины для теплоэлектростанции учитывают, что турбина будет работать при частоте 3000 мин$^{-1}$. Следовательно, колебания, вызываемые вращением ротора, будут иметь частоту $\frac{3000}{60\ с}$ = 50 Гц. Чтобы избежать резонансных колебаний, вся система "генератор — турбина — фундамент" должна иметь частоту свободных колебаний, отличную от 50 и не кратную 50.

Проиллюстрируем этот способ борьбы с опасными последствиями резонанса на опыте. Соберем установку, показанную на рис. 155. При включении вибратора пружинный маятник начинает колебаться со все возрастающей амплитудой, что свидетельствует о том, что частота вынужденных колебаний близка к частоте свободных колебаний.

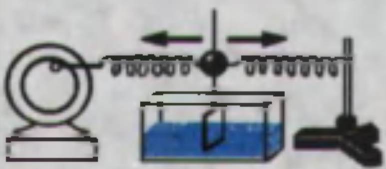


*Рис. 159*

Остановив маятник, заменим его груз другим грузом большей массы (этим мы изменим собственную частоту колебаний маятника). Вновь включив вибратор, увидим, что амплитуда колебаний маятника стала значительно меньше. Теперь колебания не имеют резонансного характера.

Другой способ борьбы заключается в увеличении трения системы (рис. 159): чем больше трение системы, тем меньше амплитуда резонансных колебаний.

?

1. Приведите примеры использования резонанса в технике.
2. Приведите примеры опасных резонансных явлений.
3. Как можно предотвратить явление резонанса?
4. Какую собственную частоту колебаний имеет стальная пластина язычкового частотомера, резонирующая при частоте переменного тока 50 Гц?

## Глава XIII. ВОЛНЫ

До сих пор рассматривались колебания в отдельных изолированных колебательных системах. Но изолированные колебательные системы встречаются значительно реже, чем системы, связанные друг с другом. Повседневные наблюдения убеждают нас в том, что в этом случае колебания от одной колебательной системы передаются другим колебательным системам. Например, колебания диффузора громкоговорителя передаются барабанной перепонке уха, колебания поплавка — частицам воды (рис. 160).

Поэтому следующим шагом в изучении колебательных и волновых явлений будет изучение процесса передачи колебаний от одной колебательной системы к другой, связанной с ней.

## §60. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

**1. Распространение колебаний.** Чтобы понять, каким образом механические колебания от одной колебательной системы передаются другой, связанной с ней, рассмотрим колебания системы шариков, укрепленных на стальных спицах и связанных между собой резиновой нитью (рис. 161).

Если отклонить от положения равновесия крайний шарик так, как это показано на рисунке, то он будет оттягивать от положения равновесия второй шарик, второй шарик будет оттягивать третий и т.д. Когда мы отпустим первый шарик, он придет в колебательное движение, которое благодаря связи между шариками передается всем остальным. Однако колебание от первого шарика передается остальным не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью. Из-за конечной скорости распространения колебаний шарики начинают колебаться с запозданием, и их положение в пространстве имеет форму знакомой волны. *Процесс распространения колебаний среди множества взаимосвязанных колебательных систем называют волновым движением.*

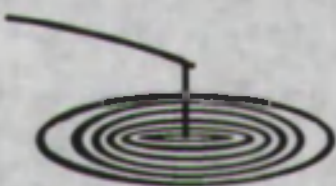


*Рис. 160*

Колебания шариков в рассмотренном примере происходят перпендикулярно направлению распространения колебаний. Образующая при этом волна получила название поперечной волны. В поперечной волне вектор скорости распространения волны и вектор скорости колебания частиц взаимно перпендикулярны (рис. 162).

Если крайний маятник отклонить влево и вправо от положения равновесия, а затем отпустить, то колебания будут передаваться от первого маятника всем остальным. Распространение колебания в этом случае также будет иметь волновой характер, но колеблющиеся маятники образуют в пространстве сгущения и разрежения (рис. 163). Колебания маятников и распространение колебаний в этом случае происходят вдоль одной прямой. Такие волны получили название *продольных* волн.

**2. Примеры механических волн.** Рассмотренный механизм распространения колебаний в системе, состоящей из соединенных между собой шариков, можно распространить на любую газообразную, жидкую и твердую среды.

Познакомимся в качестве примера с поперечными волнами, распространяющимися по упругому шнуру. Прикрепим к потолку упругий (резиновый или пластмассовый) шнур и резким движением руки заставим его свободный конец совершить одно колебание. Вдоль шнура побежит одиночная поперечная волна. Такую волну называют *бегущей* (рис. 164, *а*).

Присоединим свободный конец шнура к вибратору, совершающему колебания (рис. 164, *b*). Тогда вдоль шнура побежит система волн.

*Рис. 161*

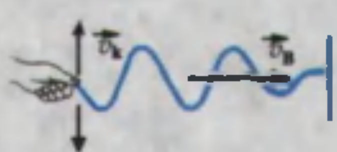




*Рис. 162*

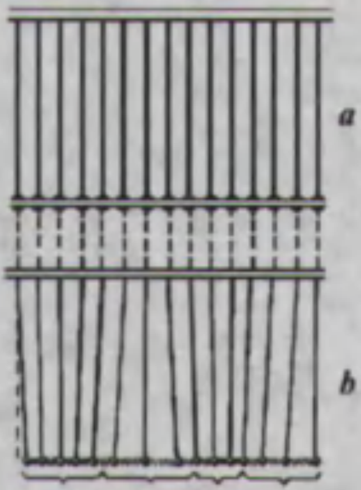



Рис. 163


Рис. 164

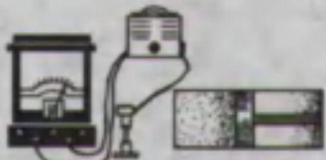


Рис. 165

На одном конце длинной стеклянной трубы поместим поршень (рис. 165). Если заставить поршень совершать колебания, то около поршня образуется то область повышенного давления (сгущение частиц воздуха), то область пониженного давления (разрежение). Частицы воздуха, примыкающие к поршню, также начнут совершать колебания. Это приведет к тому, что через небольшой промежуток времени все частицы воздуха в трубе придут в колебательное движение, которое будет воспринято микрофоном, установленным у противоположного конца трубы, и отмечено колебанием стрелки гальванометра. Продольные волны в воздухе с частотой от 20 до 20000 Гц воспринимаются нами как звук и называются *звуковыми* волнами. Волны с частотой, меньшей 20 Гц, называются *инфразвуковыми*, а волны с частотой, большей 20000 Гц, — *ультразвуковыми*.

Очень наглядны знакомые нам волны на поверхности воды. Поэтому для изучения свойств волн мы часто будем прибегать к помощи так называемой волновой ванны — неглубокого сосуда с прозрачным дном и пологими боковыми стенками (рис. 166). В сосуд наливают тонкий слой жидкости. Для возбуждения волн используют специальный вибратор, конец которого касается поверхности жидкости. При колебаниях вибратора по поверхности жидкости распространяются волны.

**3. Энергия волны.** Распространение колебаний в среде связано с передачей энергии от одной колеблющейся частицы к другой. Например, камень, брошенный в воду небольшого озера, создает на поверхности воды волны, которым передает часть своей энергии. Дойдя до берега, эти волны передают полученную ими от камня энергию прибрежным камышам (рис. 167). Энергия колеблющейся струны гитары переносится звуковыми волнами и воспринимается ухом или микрофоном.

Таким образом, волны переносят энергию от одной колеблющейся частицы среды к другой. Однако сами *частицы при этом только колеблются около своих положений равновесия, но не движутся вместе с волной.*

Энергия, переносимая волной, равна сумме кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации среды.

Энергия, которую несет с собой волна, распространяется вместе с волной в том же направлении.

**4. Длина волны.** Длиной волны называют расстояние, на которое распространяется колебание за один период (рис. 168). Обозначив длину волны греческой буквой λ (лямбда), можно записать:

$$\boxed{\lambda = vT} \quad \text{или} \quad \boxed{\lambda = \frac{v}{\nu}}$$

*Рис. 166*



*Рис. 168*

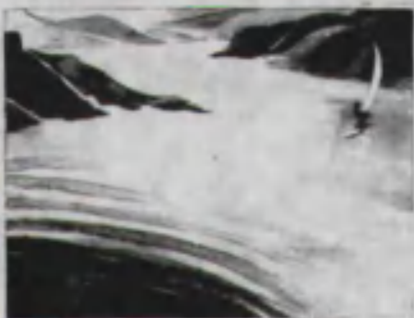


*Рис. 167*

**?** 1. Какое движение называют волновым?
2. Приведите примеры механических волн.
3. Какие волны называют поперечными? Приведите примеры поперечных волн.
4. Найдите минимальную и максимальную длины звуковых волн, если скорость звука в воздухе 334 м/с.

### *Упражнение 12*

**1.** Если подержать некоторое время один из одинаковых камертонов в руке, а потом заставить звучать их одновременно, то вместо привычного звучания в унисон будут слышны биения. Почему?

**2.** Координата колеблющегося тела изменяется по закону $x = 2\sin\frac{\pi}{4}t$.

Чему равны амплитуда и период колебаний?

**3.** Частота колебаний тела 5 Гц. Чему равен период колебаний? (Ответ: $T = 0{,}2$ с).

**4.** За 2 мин груз на пружине совершает 60 колебаний. Определите массу этого груза, если жесткость пружины 4,9 Н/м. (Ответ: $m = 0{,}5$ кг).

**5.** Груз массой 9,86 кг колеблется на пружине, имея период колебаний 2 с. Чему равна жесткость пружины? Какова частота колебаний груза? (Ответ: $k = 97$ Н/м; $\nu = 0{,}51$ Гц).

**6.** Каково ускорение свободного падения на Луне, если там мятник длиной 1 м имеет период колебаний 4,9 с? (Ответ: $g = 1{,}6$ м/с$^2$).

## §61. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

**1. Звуковые волны.** Причиной звуковых ощущений является действие на органы слуха продольных волн, распространяющихся в воздухе (или другой упругой среде) под влиянием механических колебаний какого-либо тела (источника звука).

Наличие упругой среды – обязательное условие для возникновения звуковых волн. Чтобы убедиться в этом, поместим под стеклянный колокол, полость которого соединена с воздушным насосом, карманный радиоприемник (рис. 169). Под приемник подложим мягкую прокладку, необходимую для того, чтобы его колебания не передавались колоколу, а от него крышке демонстрационного стола.

Включив приемник, мы услышим достаточно громкий звук. Если из-под колокола откачивать воздух, то громкость звучания постепенно убывает, и звук, наконец, исчезает. Впустив под колокол воздух, вновь услышим громкий звук. Наше ухо воспринимает колебания в интервале частот приблизительно от 20 до 20000 Гц.

Скорость звуковых волн в воздухе при температуре 0°С равна 334 м/с. Следовательно, длины звуковых волн в воздухе принимают значения

$$\text{от } \lambda_1 = \frac{334\text{ м/с}}{20\cdot 1/\text{с}} \approx 17\text{ м до } \lambda_2 = \frac{334\text{ м/с}}{20000\cdot 1/\text{с}} = 0{,}017\text{ м}.$$

Продольные механические волны большей длины называют инфразвуковыми, а волны меньшей длины — ультразвуковыми.

Излучение звуковых волн сильно зависит от формы колеблющегося тела. Например, камертон очень плохо излучает звуковые волны. Это происходит потому, что ножки камертона при колебаниях всегда движутся в противоположные стороны и возбуждаемые ими волны взаимно ослабляют друг друга. Излучение камертона можно сделать более интенсивным, используя явление резонанса. Для этого камертон укрепляют на специальном ящике (рис. 170). Столб воздуха внутри ящика ре-

*Рис. 169*

зонирует с колебаниями ножек камертона. Это приводит к интенсивному излучению волн.

Нечто подобное происходит и в струнных музыкальных инструментах. Сама струна излучает в виде звуковых волн очень малую часть энергии ее колебаний. Излучение громкого звука гитарой, скрипкой, арфой и другими струнными инструментами происходит, главным образом, потому, что струны передают энергию своих колебаний корпусу инструмента и заключенному в нем воздуху, вызывая вынужденные колебания. При этом корпус и воздух в корпусе резонируют и излучают значительно более громкий звук, чем струна.

**2. Приемники звуковых волн.** Естественным приемником звуковых волн является ухо. Ухо является исключительно чувствительным органом. Чувствительность уха такова, что мы воспринимаем звук уже при давлении звуковой волны, равном $10^{-6}$ Па. Чувствительность уха неодинакова к звуковым колебаниям различных частот. В области низких частот чувствительность уха резко снижается. Так, чувствительность к звуку частотой 100 Гц приблизительно в 1000 раз меньше, чем к звуку частотой 1000 Гц. Чувствительность уха к звукам высокой частоты меняется с возрастом: в детстве мы слышим высокочастотные звуки лучше, чем в зрелом возрасте. При столь большой чувствительности наше ухо выдерживает звуковые колебания, создающие большие давления.

Наш слух обладает и исключительной избирательной способностью. Среди множества разговаривающих людей мы способны выделить негромкую речь одного человека. Дири-

*Рис. 170*


*Рис. 171*

жер большого симфонического оркестра слышит звуки отдельных инструментов.

Одним из технических приемников звуковых волн является микрофон. Микрофон преобразует звуковые колебания в электрические. Микрофоны, как и ухо, также характеризуются определенной чувствительностью.

Чувствительность микрофона зависит от частоты. Графическое изображение этой зависимости называют частотной характеристикой микрофона. Она показана на рис. 171.

**3. Характеристики звука.** Восприятие звуков человеком субъективно: например, один и тот же звук два человека могут воспринимать по-разному: одному звук кажется нормальным, другому – очень громким. Поэтому перечисленные ниже характеристики звука называют *субъективными*.

Субъективной характеристикой звука является его *громкость*. Громкость звука зависит не только от звуковой волны, но и от чувствительности уха.

*Рис. 172*

Единицу громкости называют белом (б) в честь американского ученого А.Г. Белла. Однако на практике пользуются дольной единицей – децибелом (дБ).

Весь диапазон воспринимаемых ухом звуковых волн соответствует громкости от 0 до 130 дБ.

На рис. 172 представлена диаграмма громкостей звуков, создаваемых различными источниками – от самых сильных (удар грома) до разговора шепотом.

Следует иметь в виду, что громкие звуки далеко не безвредны для нашего организма. Поэтому на основе соответствующих исследований органами здравоохранения установлены санитарные нормы для уровня допустимого шума. Согласно этим нормам уровень громкости шумов не должен превосходить 30-40 дБ, что соответствует уровню громкости речи при спокойной, тихой беседе.

● *Соблюдение этих норм обязательно для всех.*

Можно, конечно, привыкнуть к шуму, научиться на замечать грохота поездов, рева грузовиков, громкого звука магнитофона. Но дело в том, что последствия шума постепенно накапливаются в организме. При длительном воздействии на организм громких звуков может возникнуть так называемая "шумовая болезнь", симптомами которой являются высокое артериальное давление крови, повышенная нервная возбудимость, тугоухость, быстрая утомляемость, плохой сон и т.д.

Второй субъективной характеристикой звука является *тембр*. Это качество звука позволяет нам различить два звука одинаковой высоты и громкости, издаваемых различными инструментами. Тембр звука – это окраска звука, зависящая от его источника.

Третьей субъективной характеристикой звука является его *высота*. Высота звука зависит от его частоты: чем больше частота звука, тем звук выше. И наоборот, чем ниже частота, тем звук ниже.

**?**

1. Какие характеристики звука вы знаете?
2. Как громкость звука зависит от амплитуды звуковой волны?
3. Какие приемники звука вы знаете?
4. О чем свидетельствует кривая на рис. 171?

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ XII—XIII ГЛАВ

**1.** При механических колебаниях тел в газах и жидкостях возникают продольные волны. Продольные волны в воздухе, длины которых лежат в интервале от 0,017 до 17 м, вызывают ощущение звука и называются звуковыми. Волны длиной от $3{,}4 \cdot 10^{-6}$ м до 0,017 м называются ультразвуковыми, а волны длиной от 17 м и больше — инфразвуковыми.

**2.** Свободные колебания возникают в колебательной системе, не подверженной действию внешних периодических сил, в результате отклонения системы от состояния устойчивого равновесия.

**3.** Свободные колебания, возникающие в колебательных системах с малым трением, практически являются гармоническими.

**4.** Для гармонических колебаний характерны свойства: а) возвращающая сила пропорциональна смещению от положения устойчивого равновесия и направлена в сторону равновесия; б)потенциальная энергия колебательной системы пропорциональна квадрату амплитуды смещения; в) смещение, скорость и ускорение изменяются по гармоническому (синусоидальному) закону; г) гармонические колебания продолжаются бесконечно.

**5.** Частота свободных колебаний зависит от параметров колебательной системы, амплитуда — от сообщенной колебательной системе энергии.

**6.** Свободные колебания в системах с трением затухают и не являются гармоническими.

**7.** Вынужденные колебания возникают в том случае, когда на колебательную систему действует внешняя периодически изменяющаяся сила.

**8.** Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающих колебаний.

**9.** Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды и частоты вынуждающих колебаний.

**10.** Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний, наступающее при приближении частоты вынуждающих колебаний к собственной частоте колебательной системы, называют резонансом.

## РОЛЬ МЕХАНИКИ В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ И РАЗВИТИИ ТЕХНИКИ

**1. Механика как раздел физики.** Человек всегда находился и находится в сложном взаимодействии с окружающим его миром. Одним из проявлений этого взаимодействия является изучение мира.

Окружающая природа исследуется рядом наук, получивших общее название – естествознание. В свою очередь, в физике механика занимает особое место. Такое положение механики обусловлено следующими главными причинами:

во-первых, на ранней стадии познания человеком окружающего мира изучение механических явлений было особенно необходимо. Знание механики требовалось для строительства жилищ, изготовления орудий труда и т.п. Поэтому на первых порах механика составляла основное содержание физики;

во-вторых, все вновь возникающие разделы физики строились на базе механики, использовали методы и понятия, первоначально в ней разработанные. Можно утверждать, что механика служит фундаментом, на котором воздвигнуто все здание современной физики.

**2. Методы механики.** Исследование физического явления начинается с наблюдения, т.е. изучения этого явления в естественной обстановке. Допустим на мгновение, что нам неизвестны законы свободного падения тел. Если мы хотим их установить, то, прежде всего, должны провести наблюдение за свободным падением тел. Однако само по себе наблюдение того или иного явления еще не дает научных знаний о нем. Вероятно, многие миллионы людей, живших до Галилея, наблюдали свободное падение тел, но никто из них не изучил этого явления. Понадобился гениальный ум Галилея для того, чтобы привести в систему случайные и разрозненные наблюдения, осмыслить и высказать предположение (гипотезу) о том, что в пустоте все тела должны падать одинаково. И не только высказать гипотезу, но и наметить пути ее проверки.

Следовательно, второй этап изучения физического явления — качественный анализ его, в ходе которого высказывается гипотеза о сущности явления и намечается план экспериментальной проверки сделанного предположения.

Физический эксперимент — следующий этап исследования явления. Как метод исследования физический эксперимент, хотя и связан с наблюдением, но тем не менее, существенно отличен от него. Наблюдение лишь фиксирует то, что лежит на поверхности явления. (Например, все люди до Галилея наблюдали, что легкие тела падают медленнее тяжелых. Но никто из них не выяснил, почему это происходит так, а не иначе.) В ходе эксперимента не только воспроизводится явление, но и исследуется его зависимость от сопутствующих условий и от параметров, характеризующих эти условия, производятся необходимые измерения.

Таким образом, при проведении эксперимента происходит активное вмешательство в ход явления с целью постижения его сущности. При постановке эксперимента обычно создаются такие условия, в которых явление выступало бы наиболее четко и ясно. Так, проводя эксперимент со свободным падением тел, Галилей в качестве падающих тел выбрал шары одинаковых размеров.

В ходе эксперимента добываются для науки новые факты, наличие которых, однако, еще не дает более или менее точного отражения действительности. Для вскрытия глубинной сущности явления вновь необходимо теоретическое осмысливание полученных экспериментальных фактов. При этом формируется необходимый математический и понятийный аппарат. Это наиболее трудная ступень изучения явлений, без которой не могут быть получены точные знания и сформулированы физические теории. Немецкий физик Макс Борн писал: "Перед физикой стоит проблема: как реальные явления, наблюдаемые с помощью наших органов чувств, обогащенных инструментами, могут быть сведены к простым понятиям, подходящим для точного измерения и полезным для формулировки количественных законов". Интересно отметить, что понятие скорости движения было известно уже Аристотелю, а термин "ускорение" был впервые введен только Понселе в 1841 г.

На этой стадии изучения физических явлений физики прибегают к использованию математики и выражают вновь введенную величину с помощью математических операций через ранее изученные. Этим создаются необходимые предпосылки для измерения величины.

Теоретический анализ результатов эксперимента дает возможность исследователю установить экспериментальные законы и включить последние в созданную им физическую теорию.

Физическая теория, объясняющая изученные явления, состоит из: 1) экспериментальных фактов, которые она объясняет и которые, в конечном счете, образуют ее базу; 2) математического аппарата, на языке которого сформулированы основные законы теории; 3) понятийного аппарата, вскрывающего физический смысл полученных формул.

Из сказанного видно, что в ходе научного исследования физики пользуются двумя основными методами: экспериментальным и теоретическим, которые неразрывно связаны. Единство теории и эксперимента нельзя рассматривать в застывшем виде. На отдельных этапах исследования эксперимент может опережать теорию, на других этапах, наоборот, возможно опережение эксперимента теорией, наконец, возможен временный параллелизм в развитии эксперимента и теории. Единство теории и эксперимента состоит в том, что они представляют два неразрывно связанных и дополняющих друг друга метода познания человеком окружающего мира.

Следует иметь в виду, что независимо от того, каким методом, экспериментальным или теоретическим, добыто знание, оно едино. Для науки, для человечества одинаково ценно знание научных фактов и теорий, объясняющих эти факты.

**3. Механика и техника**. Физика как наука возникла в результате потребностей общественного производства. При этом различные ее области появлялись одна за другой вслед за соответствующими потребностями. Так как на ранней стадии своего развития человек, в основном, занимался скотоводством и земледелием, то у пастушеских и земледельческих народов раньше других возникла необходимость в знании закономерностей смены времен года. Это породило ту область физики, которая впоследствии выделилась в астрономию. Но астрономия могла развиваться только при помощи математики. Отсюда — потребность в математических знаниях и, как следствие этого, становление математики. Итак, и возникновение механики, и ее развитие обусловлено потребностями производства. С момента возникновения механика связана с решением технических проблем.

Механика сегодня — научная основа космонавтики, авиации, надводного и подводного транспорта, машиностроения, строительной, оборонной и медицинской техники. (Стоит вспомнить аппараты "искусственное сердце", "искусственная почка", "искусственные клапаны сердца" и т.п.) Практически нет сейчас ни одного производства, для которого в той или иной мере не были бы нужны знания механики.

**4. Механика и познание природы**. Ни одно явление природы не может быть всесторонне познано без изучения его механической стороны. В этом нет ничего удивительного: многие явления в окружающем нас мире связаны с механическим движением. Движение Солнца, Земли и других планет, движение воды и воздуха, падение тел, перемещение людей, животных, рыб, птиц и насекомых, движение крови и лимфы в телах животных, растворов солей в растениях, деятельность сердца, легких и других органов человека и животных, деление клеток — вот далеко не полный перечень явлений, которые невозможно объяснить без знания механики. Можно утверждать (и это не будет преувеличением), что механика является основой познания природы. Без знания механики нельзя изучить окружающий нас мир.

**5. Область применения классической механики**. Механику, основы которой вы изучали, пользуясь этим учебником, называют механикой Ньютона. Основные законы (принципы) ее были сформулированы Ньютоном в работе "Математические начала натуральной философии" (так в то время называли физику), опубликованной в 1687 г. Ньютон гениально обобщил все, что было достигнуто в механике до него, и воздвиг стройное здание механики-науки. Уместно еще раз подчеркнуть, что принципы (законы) механики не могут быть выведены ни логически, ни экспериментально. Справедливость этих законов с высокой точностью подтверждается всей системой опытных фактов, которыми владеет человечество. Механику Ньютона часто называют классической механикой, подчеркивая эпитетом "классическая" уважение и к ее основам, и к ее творцу.

Законы классической механики были установлены для тел, которые нас окружают в повседневной жизни, т.е. для тел, состоящих из громадного числа молекул и атомов. Возникает вопрос: а применимы ли законы классической механики к движению атомов, молекул, элементарных частиц? В настоящее время надежно установлено, что законы классической механики лишь ограниченно применимы к движению частиц микромира.

Законы механики Ньютона были установлены для сравнительно небольших скоростей, с которыми тела могут двигаться в земных и космических условиях. Эти скорости значительно меньше скорости света. Но применимы ли эти законы к миру быстрых движений, скорости которых сравнимы со скоростью света? Расчеты показывают, что движения тел со скоростями до нескольких сотен километров в секунду весьма точно описываются законами классической механики. Поэтому все расчеты, связанные, например, с запуском космических кораблей, проводятся по ее законам.

*Таким образом, классическая механика правильно* описывает движение макроскопических тел со скоростями, значительно меньшими скорости света. Альберт Эйнштейн следующим образом оценил значение классической механики Ньютона: "Пусть никто не думает, что великое создание Ньютона может быть ниспровергнуто теорией относительности или какой-нибудь другой теорией. Ясные и широкие идеи Ньютона навечно сохранят значение фундамента, на котором построены наши современные физические представления".

Этими словами ученого мы и закончим наш курс, в котором изложены основы классической механики.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ИЗУЧЕННОГО МАТЕРИАЛА

### Кинематика

**1.** Два автомобиля равномерно движутся по взаимноперпендикулярным дорогам по направлению к перекрестку этих дорог. Один из автомобилей, движущийся со скоростью 40 км/ч, находится на расстоянии 400 м от перекрестка. С какой скоростью должен двигаться другой автомобиль, находящийся на расстоянии 700 м от перекрестка, чтобы подъехать к нему одновременно с первым? (Ответ: $v = 19$ м/с).

**2.** Какое расстояние пройдет автомобиль при торможении до полной остановки, если его скорость в момент начала торможения 36 км/ч, а время торможения 10 с? (Ответ: $S = 50$ м).

**3.** Автомобиль при торможении до полной остановки прошел расстояние 100 м. С каким ускорением он двигался, если начальная скорость его движения была 72 км/ч? (Ответ: $a = 2$ м/с$^2$).

**4.** Водитель автомобиля, двигавшегося со скоростью 72 км/ч, увидел красный сигнал светофора и нажал на тормоз. Какое расстояние прошел автомобиль до полной остановки, если он двигался с ускорением 5 м/с$^2$? (Ответ: $S$ = 40 м).

**5.** Теплоход движется по озеру прямолинейно с постоянной скоростью 36 км/ч; катер, плывущий параллельным курсом, имеет скорость 90 км/ч. Определите скорость катера относительно теплохода. (Ответ: $v$ = 15 км/ч).

**6.** Решите предыдущую задачу для случая, когда катер движется перпендикулярно курсу теплохода. (Ответ: $v$ = 27 м/с).

**7.** Два тела, имевшие начальные скорости относительно лаборатории 10 и 15 м/с, начали двигаться одновременно навстречу друг другу. Первое тело двигалось равноускоренно с ускорением 0,2 м/с$^2$, а второе — равнозамедленно с таким же по модулю ускорением. Определите их относительную скорость на месте встречи. (Ответ: $v$ = 25 м/с).

**8.** Тело перемещается по окружности радиусом 50 м. Какой путь оно пройдет за 5 мин., если период его обращения 10 с? Какова линейная скорость тела? (Ответ: $s$ = 9420 м; $v$ = 31,4 м/с).

**9.** Самолет, выходя из "пике", движется по траектории, которая в нижней части является дугой окружности радиусом 500 м. Вычислите ускорение самолета в наинизшей точке траектории, если его скорость 720 км/ч. (Ответ: $a$ = 80 м/с$^2$).

## Законы движения

**10.** Упавший на пол мяч отскочил вверх. Объясните, почему это произошло.

**11.** Объясните, почему слесарные верстаки делают массивными.

**12.** В течение какого времени на тело массой 50 кг действовала сила 20 Н, если тело приобрело скорость 2 м/с? Силы трения отсутствуют. (Ответ: $t$ = 5 с).

**13.** На два тела действуют равные силы. Первое из них имеет массу 1 кг и движется с ускорением 2 м/с$^2$. Второе тело движется с ускорением 1 м/с$^2$. Какова его масса? (Ответ: $m$ = 2 кг).

**14.** Найдите ускорение свободного падения на планете Марс, если известно, что сила притяжения тел, находящихся на его поверхности, в 2,8 раза меньше силы притяжения этих тел на поверхности Земли. (Ответ: $g$ = 3,5 м/с$^2$).

**15.** Тело массой 3 кг падает вертикально с ускорением 7,2 м/с$^2$. Определите силу сопротивления воздуха. (Ответ: $F_{сопр}$ = 7,8 Н).

**16.** Два груза массой $M$ каждый подвешены на легкой и прочной нити, перекинутой через неподвижный блок. На один из грузов положили еще один такой же груз $M$. С каким ускорением будут двигаться грузы?

(Ответ: $a = \dfrac{1}{3}g$).

**17.** Парашютист, падавший со скоростью 55 м/с, раскрыл парашют, после чего скорость его падения за 2 с уменьшилась до 5 м/с. Определите силу торможения парашютиста, если его масса 80 кг. (Ответ: $F_{торм} = 2{,}8$ кН).

**18.** Сила тяги, действующая на автомобиль, равна 1000 Н, а сила сопротивления его движению только 500 Н. Не нарушается ли при этом третий закон Ньютона?

**19.** Самолет массой 40000 кг движется со скоростью 900 км/ч. Навстречу ему летит со скоростью 5 м/с птица массой 1 кг. Определите силу удара птицы о стекло кабины летчика, если длительность удара примерно 0,001 с. (Ответ: $F \approx 2{,}5 \cdot 10^5$ Н).

**20.** Гидрореактивный катер всасывает и выбрасывает 1 м$^3$ воды в секунду. Скорость выбрасывания воды 30 м/с. Найдите скорость катера в конце первой секунды, если его масса 3 т. (Ответ: $v = 10$ м/с).

**21.** Масса корпуса сигнальной ракеты 250 г. Внутри корпуса находится горючее массой 350 г. На какую высоту поднимется ракета при вертикальном запуске, если скорость вытекания газов 50 м/с? Сгорание топлива считайте мгновенным. (Ответ: $h \approx 250$ м).

**22.** Снаряд массой 10 кг вылетает из ствола орудия со скоростью 600 м/с. Определите среднюю силу давления пороховых газов на снаряд, если длина ствола орудия 3 м. Движение снаряда можно считать равноускоренным. (Ответ: $F = 6 \cdot 10^5$ Н).

**23.** Два мальчика массами 30 кг и 50 кг, стоящие на коньках на расстоянии 8 м друг от друга, выбирают натянутую между ними веревку. В каком месте и через какое время они встретятся? Сила, с которой тянет веревку первый мальчик, равна 80 Н. (Ответ: $s = 5$ м; $t = 1{,}9$ с).

**24.** Стальная проволока выдерживает нагрузку до 4500 Н. С каким наибольшим ускорением можно поднимать вертикально вверх груз массой 400 кг, подвешенный на этой проволоке, чтобы она не оборвалась? (Ответ: $a = 1{,}25$ м/с$^2$).

## Закон всемирного тяготения

**25.** Сила взаимодействия любого тела с Землей уменьшается с подъемом тела над поверхностью Земли. Увеличится ли сила притяжения тела к Земле, если его опустить на дно глубокой шахты? Ответ обоснуйте.

**26.** Определите линейную скорость движения Луны вокруг Земли, если известно, что расстояние между ними 384 000 км, а массы соответственно $7{,}3 \cdot 10^{22}$ кг и $6 \cdot 10^{24}$ кг. (Ответ: $v = 10^3$ м/с).

27. В земную атмосферу ежегодно влетает до 9 млрд. метеоритов. За их счет масса Земли ежегодно увеличивается на $10^6$ кг. Может ли это изменение массы Земли заметно изменить ускорение свободного падения? Обоснуйте ответ.

**28.** Вычислите линейную скорость движения Земли вокруг Солнца, если известны массы Земли и Солнца, а расстояние между ними равно $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м. (Ответ: $v = 3 \cdot 10^4$ м/с).

**29.** Вычислите первую космическую скорость на Луне, если ее радиус $1,76 \cdot 10^6$ м, ускорение свободного падения на ней $1,7$ м/с$^2$. (Ответ: $v = 1,7 \cdot 10^3$ м/с).

**30.** Целесообразно ли в условиях невесомости применять механизмы с маховым колесом — ведь маховик там также невесом?

**31.** Почему космические корабли запускают в направлении с запада на восток?

**32.** Спутник обращается вокруг Земли по круговой орбите на высоте 1700 км. Определите его линейную скорость и период обращения (Ответ: $v = 7,0 \cdot 10^3$ м/с; $T = 7198$ с).

**33.** В таблице даны радиусы и массы Земли, Марса, Венеры в условных единицах. Найдите ускорение силы тяжести на поверхности этих планет, приняв земное за (1; 0,39; 0,89).

| Планеты | Радиус | Масса |
|---|---|---|
| Земля | 1,00 | 1,00 |
| Марс | 0,53 | 0,11 |
| Венера | 0,96 | 0,82 |

**34.** Тело взвесили на пружинных и рычажных весах на экваторе и на полюсе. Каковы показания приборов?

**35.** На какой высоте ускорение свободного падения составляет четвертую часть ускорения свободного падения у поверхности Земли? (Ответ: $h = R$).

**36.** Баллистическая межконтинентальная ракета достигла заданного района через 20 мин. На какую максимальную высоту она поднималась во время полета (теоретически)? С какого момента времени для ракеты наступило состояние невесомости и как долго оно продолжалось? (Ответ: $s = 1,8 \cdot 10^6$ м; $t = 10$ мин).

## Движение при наличии сил трения

**37.** С каким ускорением движется тело массой 2 кг под действием силы 20 Н, направленной под углом 30° к горизонту, если коэффициент трения тела о поверхность, по которой оно движется, 0,05? (Ответ: $a = 8,41$ м/с$^2$).

**38.** Скатывающиеся с горы санки за 5 с прошли путь 50 м. Скорость санок за это время возросла в 3 раза. Определите коэффициент трения скольжения санок по поверхности горы, если угол ее наклона 30°. (Ответ: $\mu = 0,34$).

**39.** К электровозу массой 130 т прицепили состав массой 2000 т. Может ли электровоз везти этот состав, если все его колеса ведущие, коэффициент их трения покоя о рельсы 0,02, а коэффициент трения катания колес вагонов 0,005?

**40.** Где и почему быстрее течение – на дне реки или у поверхности?

**41.** Почему даже самый слабый ветерок может сдвинуть огромный айсберг, но только ураганный ветер может переместить кусок льда по берегу?

**42.** Коэффициент трения деревянных полозьев саней о снег равен 0,03. Какую силу прикладывает лошадь, равномерно перемещая по горизонтальной дороге сани массой 400 кг?

(Ответ: $F_т = 120$ Н).

**43.** Вверх по канатной дороге поднимается с постоянной скоростью вагонетка массой 500 кг. Вычислите натяжение каната, если угол наклона дороги 30°, а коэффициент трения катания вагонетки по рельсам 0,2.

(Ответ: $F_н \approx 3300$ Н).

**44.** Тело массой 10 кг тянут по горизонтальной поверхности силой 40 Н, приложенной под углом 60° к горизонту. Тело движется равномерно. С каким ускорением станет двигаться тело, если сила будет направлена горизонтально?

(Ответ: $a \approx 1$ м/с$^2$).

**45.** На наклонную плоскость с углом наклона 30° поместили кубик. Коэффициент трения кубика о плоскость 0,5. Найдите его ускорение. (Ответ: $a = 0{,}66$ м/с$^2$).

**46.** С наклонной плоскости начинает соскальзывать тело. За какое время оно пройдет расстояние 10 м, если угол наклона плоскости к горизонту 30°? Трение не учитывать. (Ответ: $t = 2$ с).

**47.** На легкоподвижную платформу вскакивает со скоростью мальчик массой $m$, а затем спрыгивает обратно с такой же скоростью. Изменится ли импульс платформы? Если изменится, то на сколько? Если не изменится, то почему?

**48.** На легкоподвижную платформу вскакивает со скоростью $v$ мальчик, пробегает по ней и спрыгивает с той же скоростью и в том же направлении, в котором бежал. Изменится ли импульс платформы? Ответ обоснуйте.

**49.** Снаряд массой 20 кг, летевший горизонтально со скоростью 50 м/с, попадает в платформу с песком массой 1000 кг, двигавшуюся навстречу снаряду со скоростью 2 м/с, и застревает в песке. Какова будет скорость платформы? (Ответ: $v = 0{,}98$ м/с).

**50.** Ракета, масса которой вместе с топливом 250 г, взлетает вертикально вверх и достигает максимальной высоты через 6 с. Определите скорость истечения газов из ракеты, считая, что сгорание топлива происходит мгновенно. Масса топлива 50 г. (Ответ: $v = 235$ м/с).

**51.** Человек, сидящий в лодке, бросает камень массой 1 кг со скоростью 10 м/с под углом 30° к горизонту. Масса лодки и человека 100 кг. Какую скорость приобретет лодка? (Ответ: $v = 0{,}09$ м/с).

## Закон сохранения импульса

**52.** По данным предыдущей задачи определите расстояние между лодкой и местом падения камня. (Ответ: $s = 9$ м).

**53.** На горизонтальном столе лежит брусок массой 5 кг. В брусок попадает пуля массой 9 г и застревает в нем. Брусок вместе с пулей сдвигается на расстояние 25 см и останавливается. Найдите скорость пули. Коэффициент трения скольжения бруска по столу 0,2. (Ответ: $v \approx 550$ м/с).

**54.** Найдите ускорение ракеты во время старта, если известно, что ее масса в этот момент 40 т, скорость выброса газов 4000 м/с, расход топлива 200 кг/с. (Ответ: $a = 20$ м/с$^2$).

**55.** Граната, летевшая в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с, разорвалась на две части массой 200 и 800 г. Больший осколок продолжал лететь горизонтально, и его скорость возросла до 40 м/с. Определите скорость меньшего осколка. (Ответ: $v_1 = 60$ м/с; направление полета противоположно первоначальному).

**56.** Снаряд, летевший в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с, разорвался на две части. Массы осколков равны 10 кг и 5 кг. Скорость меньшего осколка равна 90 м/с и направлена в ту же сторону, что и скорость снаряда до разрыва. Определите скорость и направление большего осколка снаряда. (Ответ: $v_2 = 15$ м/с; направление полета противоположно первоначальному).

**57.** С носа лодки массой 180 кг, движущейся со скоростью 1 м/с, ныряет мальчик массой 50 кг. Какой станет скорость лодки, если скорость мальчика направлена горизонтально и равна 4 м/с? Все скорости указаны в системе отсчета "Земля". (Ответ: $v_2 = 2,1$ м/с).

**58.** Два бильярдных шара находятся на небольшом расстоянии друг от друга. В один из шаров ударяют вдоль прямой, соединяющей центры масс первых двух шаров, точно таким же третьим шаром со скоростью 6 м/с. Считая удар абсолютно упругим, определите скорость шаров после удара. (Ответ: $v_1 = 0$; $v_2 = 0$; $v_3 = 6$ м/с).

## Закон сохранения энергии

**59.** Какая работа будет совершена, если с силой 30 Н поднять тело массой 1 кг на высоту 5 м? (Ответ: $A = 150$ Дж).

**60.** Не противоречит ли ответ в предыдущей задаче закону превращения и сохранения энергии: ведь потенциальная энергия поднятого тела равна только 49 Дж? Ответ обоснуйте.

**61.** Тело массой 2 кг, брошенное с высоты 250 м вертикально вниз со скоростью 20 м/с, погрузилось в землю на глубину 20 см. Определите среднюю силу сопротивления почвы. Сопротивление воздуха не учитывайте. (Ответ: $F_{сопр} \approx 26500$ Н).

**62.** Пружина жесткостью 800 Н/м и длиной 15 см поставлена в сжатом состоянии между двумя шарами массой по 1 кг. Затем она распрямляется и расталкивает шары. Определите скорость шаров в момент отделения их от пружины, если известно, что длина пружины в сжатом состоянии была 10 см. (Ответ: $v$ = 1 м/с).

**63.** *Поезд, движущийся со скоростью 72 км/ч, тормозит и останавливается, пройдя 1 км. Найдите работу сил трения, если масса поезда 1000 т.* (Ответ: $A = 2 \cdot 10^8$ Дж).

**64.** Свинцовый шар массой 0,5 кг, двигавшийся со скоростью 0,1 м/с, столкнулся с неподвижным шаром из глины массой 0,2 кг; после этого шары стали двигаться вместе. Определите их кинетическую энергию после удара. (Ответ: $W_k = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ Дж).

**65.** Шар массой 3 кг падает с высоты 3 м на пружину и сжимает ее. Вычислите максимальное сжатие пружины, если ее жесткость 700 Н/м. Массу пружины не учитывайте. (Ответ: $x$ = 0,55 м).

**66.** *Какую среднюю мощность развивает человек массой 70 кг,* взбегая за 15 с на холм высотой 10 м? (Ответ: $P$ = 457 Вт).

**67.** Подъемный кран приводится в действие двигателем с полезной мощностью 10 кВт. За какое время груз массой 2 т может быть равномерно поднят этим краном на высоту 50 м, если КПД его подъемного механизма равен 75%. (Ответ: $t$ = 130 с).

**68.** Пуля массой 10 г вылетает из ствола винтовки со скоростью 600 м/с и пробивает доску, в результате чего скорость пули уменьшилась до 500 м/с. Определите работу по преодолению сопротивления доски. (Ответ: $A$ = 0,5 кДж).

**69.** *Вверх по наклонной плоскости от ее нижнего края начинает* движение тело с начальной скоростью 10 м/с. На каком расстоянии от нижнего края плоскости кинетическая энергия тела уменьшится в два раза? Коэффициент трения между телом и плоскостью 0,6, угол наклона плоскости к горизонту 30°. (Ответ: $s$ = 2,5 м).

**70.** Какую мощность развивает двигатель автомобиля ЗИЛ-130, если при силе тяги 4500 Н автомобиль движется со скоростью 20 м/с? (Ответ: $P$ = 90 кВт).

**71.** Мощность электровоза М-8 равна 4000 кВт. Найдите силу тяги электровоза при скорости движения 72 км/ч. (Ответ: $F_т = 2 \cdot 10^5$ Н).

**72.** Чему равен расход воды в четырех турбинах ГЭС, если мощность каждой из них 255 МВт, КПД 93,5%, а вода падает с высоты 96 м? (Ответ: $Q$ = 1000 м$^3$/с).

**73.** Через плотину ГЭС высотой 4 м ежесекундно протекает 10 м$^3$ воды. Какую работу совершает сила тяжести при падении воды на турбину за 1 с и какое при этом происходит изменение потенциальной энергии? Какая кинетическая энергия сообщается лопаткам турбины? (Ответ: $A = 4 \cdot 10^5$ Дж).

22.3я721

**Н.М.Шахмаев, Д.Ш. Шадиев**

Ш.31 Физика. Учебник для 8-класса общеобразовательных школ. Т.: "Ижод дунёси", 2004.— 256 с.

**ББК 22.3я 721**

*Учебное издание*

Н.М.ШАХМАЕВ, Д.Ш. ШАДИЕВ

# ФИЗИКА

Учебник для 8-класса общеобразовательных школ.

*Ташкент, Издательский дом "Ижод дунёси", 2004*

Редактор *М. Садыков*
Худ. редактор *Ш. Одилов*
Тех.редактор *Е. Толочко*
Дизайнер и компьютерная верстка *А. Тиллаходжаев*
Корректор *Ш. Инагамова*

Подписано в печать 13.05.2004. Формат 84х108 $^1/_{32}$. Кегль 10,5. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл.п.л 13,44. Учет. из. л. 12,38. Договор № 5-2004. Тираж 2200 экз. Заказ № А-5565.

**Для библиотечного фонда**

Издательский дом "Ижод дунёси". Ташкент, 129, ул. Навои,30.

Отпечатано на Ташкентском полиграфическом комбинате
Ташкент, 700129, ул. Навои,30.

***Сведения о состоянии арендного учебника***

| № | Фамилия, имя ученика | Учебный год | Состояние учебника при получении | Подпись классного руководителя | Состояние учебника при сдаче | Подпись классного руководителя |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |

***Таблица заполняется классным руководителем при передаче учебника в аренду и возвращении назад в конце учебного года. При заполнении таблицы используются следующие оценочные критерии:***

| | |
|---|---|
| **Новый учебник** | Состояние учебника при первой передаче в аренду. |
| **Хорошо** | Обложка цела, не оторвана от блока книги. Все страницы в наличии, не порваны, не выпадают из блока, на страницах нет записей и помарок. |
| **Удовлетворительно** | Обложка несколько отходит от блока, слегка помята, испачкана, края потёрты; удовлетворительно восстановлена пользователем. Некоторые страницы исчерчены, выпавшие страницы приклеены. Учебник реставрирован. |
| **Неудовлетворительно** | Обложка испачкана, порвана, оторвана от блока книги или совсем отсутствует. Страницы порваны, исчерчены, в помарках, некоторых страниц не хватает. Учебник не пригоден к восстановлению. |