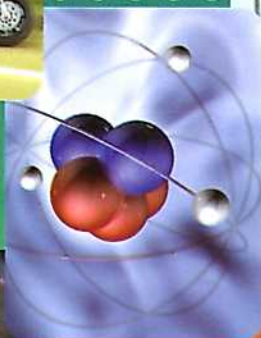


Л. Э. Генденштейн, А. Б. Кайдалов, В. Б. Кожевников

ФИЗИКА

9 УЧЕБНИК
класс



Л. Э. Генденштейн, А. Б. Кайдалов, В. Б. Кожевников

ФИЗИКА

9 класс

В двух частях

Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений

Под редакцией В. А. ОРЛОВА, И. И. РОЙЗЕНА

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*

4-е издание, стереотипное



Москва 2012

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Г34

На учебник получены положительные заключения
Российской академии наук (№ 10106–5215/33 от 29.09.2011)
и Российской академии образования (№ 01–5/7д–745 от 24.10.2011)

Генденштейн Л. Э.

Г34 Физика. 9 класс. В 2 ч. Ч. 1. Учебник для общеобразовательных учреждений / Л. Э. Генденштейн, А. Б. Кайдалов, В. Б. Кожевников ; под ред. В. А. Орлова, И. И. Ройзена. — 4-е изд., стер. — М. : Мнемозина, 2012. — 272 с. : ил.

ISBN 978-5-346-02149-0

Данный учебник полностью соответствует образовательному стандарту второго поколения и является третьим в линии учебников физики для основной школы, созданных одним коллективом авторов. Последовательность изложения материала в линии: 7 класс — первые сведения о механических явлениях, давление в жидкостях и газах, работа и простые механизмы; 8 класс — тепловые, электромагнитные, оптические явления; 9 класс — механические, квантовые явления, строение и эволюция Вселенной. Все учебники двухуровневые: материал первого уровня адресован всем учащимся, материал второго уровня — прежде всего тем, кто заинтересуется физикой. Вопросы и задания в конце параграфов также разделены на два уровня сложности. Отличительной особенностью всех книг линии является большое количество цветных иллюстраций.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

Учебное издание

Генденштейн Лев Элевич,

Кайдалов Алексей Борисович, Кожевников Валентин Борисович

ФИЗИКА

9 класс

В двух частях

Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений

Формат 60×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Школьная».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,0. Тираж 6900 экз. Заказ №240

Издательство «Мнемозина». 105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29 б.

Тел.: 8 (499) 367 5418, 367 5627, 367 6781; факс: 8 (499) 165 9218.

E-mail: ioc@mnemozina.ru www.mnemozina.ru

Магазин «Мнемозина» (розничная и мелкооптовая продажа книг,

«КНИГА — ПОЧТОЙ», ИНТЕРНЕТ-магазин).

105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29 б.

Тел./факс: 8 (495) 783 8284; тел.: 8 (495) 783 8285.

E-mail: magazin@mnemozina.ru www.shop.mnemozina.ru

Торговый дом «Мнемозина» (оптовая продажа книг).

Тел./факс: 8 (495) 665 6031 (многоканальный). E-mail: td@mnemozina.ru

Отпечатано в ООО «Финтрекс». 115477, Москва, ул. Кантемировская, 60.

© «Мнемозина», 2009

© «Мнемозина», 2012

© Оформление. «Мнемозина», 2012

Все права защищены

ISBN 978-5-346-02148-3 (общ.)

ISBN 978-5-346-02149-0 (ч. 1)

К УЧИТЕЛЮ И УЧЕНИКУ

- Предлагаемый вам учебник — двухуровневый. Авторы исходили из того, что хорошо знать изученный материал должны все ученики, а те, кто заинтересуются физикой и пожелают получить высокую оценку, должны знать больше.
- В первой части каждого параграфа изложены главные факты и положения, даны описания основных опытов. Этот материал адресован всем учащимся.
- Во второй части параграфа (названной «Развитие темы») представлено обоснование положений, приведенных в первой части, рассмотрены более сложные вопросы и примеры, а также некоторые любопытные факты, расширяющие представление о физике и ее применении. Однако предлагаемый материал (за редкими, специально оговоренными исключениями) остается в рамках образовательного стандарта. Вторая часть параграфа предлагается для изучения (или хотя бы для ознакомительного чтения) всем учащимся; для тех же учеников, которые заинтересуются физикой и пожелают получить высокую оценку, эта часть параграфа так же обязательна, как и первая.
- Вопросы и задания в конце каждого параграфа также разделены на два уровня сложности. Задания первого уровня предназначены всем девятиклассникам, а второго — тем, кто изучил материал всего параграфа.
- В тексте многих параграфов есть вопросы и устные задачи. Они предназначены для того, чтобы сразу же применить новое понятие на конкретном примере, освоиться с новой формулой, представить, насколько мала или велика по «житейским меркам» единица физической величины. Поэтому полезно использовать эти вопросы и устные задачи непосредственно при изложении или изучении нового материала.
- Самые главные положения каждого параграфа собраны в рубрике «Что мы узнали». Эта рубрика позволит ученику лучше осознать изученное, поможет грамотно составить конспект, подвести итог, а при подготовке к тематическому контролю станет «путеводителем» в повторении материала. Благодаря этой рубрике учитель будет избавлен от необходимости диктовать учащимся основные положения изучаемого параграфа.
- Значительная часть учебного материала представлена в виде примеров решения задач. Эти примеры — не дополнение, а важная составная часть учебника. Они помогут не только научиться решать задачи, но и позволят понять, как

рождаются задачи по физике, то есть познакомят учеников с элементами научного поиска.

- Физика — наука экспериментальная. Поэтому в учебнике приведено иллюстрированное описание большого числа опытов. Некоторые из этих опытов учитель может представить как демонстрационные, другие же опыты ученики могут провести самостоятельно или с помощью учителя в физическом кабинете.

- Один параграф учебника рассчитан в среднем на одну учебную неделю (2 урока). Параграфы разбиты на пункты (разделы), чтобы предоставить возможность различного подхода к изучению: учитель может либо на первом уроке рассмотреть содержание всего параграфа, а следующий урок посвятить обсуждению этого материала и решению задач, либо на первом уроке изучить полностью некоторые разделы параграфа, а на втором — завершить изучение, рассмотрев оставшиеся пункты.

- В конце учебника есть раздел «Материал для повторения при подготовке к Государственной итоговой аттестации», где приведены все основные положения курса физики 7-го и 8-го классов с формулами и пояснениями к ним. Этот материал окажется полезным и при изучении курса физики 9-го класса. Во втором основном компоненте учебно-методического комплекта — задачнике по физике для 9-го класса — содержатся задачи для подготовки к Государственной итоговой аттестации.

Глава 1

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

- Механическое движение. Система отсчета
- Скорость и путь
- Прямолинейное равноускоренное движение
- Путь при прямолинейном равноускоренном движении
- Равномерное движение по окружности
- Закон инерции — первый закон Ньютона
- Взаимодействия и силы
- Второй закон Ньютона
- Третий закон Ньютона
- Закон всемирного тяготения
- Силы трения
- Импульс. Закон сохранения импульса
- Механическая работа. Мощность
- Энергия
- Механические колебания
- Механические волны
- Звук



§ 1.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. СИСТЕМА ОТСЧЕТА

1. Относительность движения
2. Материальная точка
3. Система отсчета
4. Траектория и путь
5. Перемещение
6. Сложение векторов
7. Вращательное движение
8. Исторический выбор системы отсчета

1. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Продолжим начатое в 7-м классе изучение *механики* — раздела физики, в котором рассматривают *движение и взаимодействие тел*.

Каждый из нас уверен, что может отличить движущееся тело от покоящегося. Но действительно ли это так? Вот, например, пассажир мчащегося поезда читает книгу (рис. 1.1). Двигается этот читатель или покоится?



Рис. 1.1. Пассажир едущего поезда движется относительно дороги, но покоится относительно вагона

Один наблюдатель — его сосед по купе — скажет, что он *покоится*. Другой же наблюдатель, стоящий на платформе, мимо которой мчится этот поезд, скажет, что читатель *движется* вместе с поездом. И оба будут *правы*!

А вы сами сейчас, *наш* читатель, покоитесь или движетесь? Не торопитесь с ответом: вспомните, что Земля вместе со всеми нами движется вокруг Солнца со скоростью $30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Да еще и вращается вокруг своей оси. Поэтому читая этот абзац, вы вместе с Землей пролетели *относительно Солнца* расстояние, примерно равное расстоянию от Москвы до Санкт-Петербурга! Но в то же самое время *относительно Земли* вы, конечно, покоились.

Эти примеры показывают, что

говорить о движении любого тела можно только *по отношению* к какому-то другому телу. В этом состоит *относительность движения*.

Поэтому

механическим движением называют изменение со временем положения тела в пространстве *относительно* других тел.

Может показаться удивительным, но относительности движения не замечали в течение тысячелетий! Первым обобщил относительность движения великий итальянский ученый Галилео Галилей, с которым мы часто будем встречаться на страницах этой книги.

? Пассажир сидит на полке едущего поезда. Приведите примеры тел, движущихся относительно пассажира; покоящихся относительно него.

2. МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Чтобы задать положение тела, надо в общем случае задать положение *нескольких* его точек. Например, для самолета это могут быть точки *A, B, C*, обозначенные на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Чтобы задать положение самолета в пространстве, надо задать положение трех его точек

Мы ограничимся пока задачами, когда положение тела в пространстве можно задать *одной* точкой, то есть когда *размерами тела можно пренебречь*.

Например, можно пренебречь размерами самолета, когда мы вычисляем время его перелета из одного города в другой (рис. 1.3), а размерами Земли — при рассмотрении ее движения вокруг Солнца (рис. 1.4).

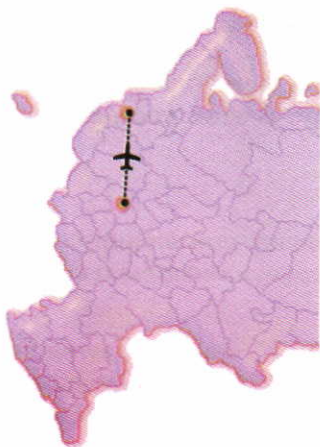


Рис. 1.3. Для нахождения времени перелета самолета из одного города в другой самолет можно считать материальной точкой

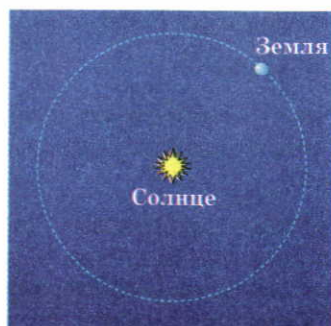


Рис. 1.4. Землю при рассмотрении ее движения вокруг Солнца можно считать материальной точкой

Физическую модель тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, называют *материальной точкой*.

Когда тело можно считать материальной точкой? Ответ на этот вопрос зависит не от размеров тела, а от *рассматриваемой задачи*.

Например, один и тот же самолет можно считать материальной точкой, если надо найти время его перелета из одного города в другой, но нельзя, если надо определить, на какой угол он наклонится при повороте.

Из приведенных выше примеров видно, что тело можно считать материальной точкой, *если размеры тела малы по сравнению с расстоянием, пройденным телом*. Бывают, од-

нако, случаи, когда размеры тела *сравнимы* с пройденным им расстоянием, но положение тела в любой момент все-таки можно задать с помощью всего *одной* его точки. Рассмотрим, например, движение мобильного телефона, схематически показанное на рис. 1.5.

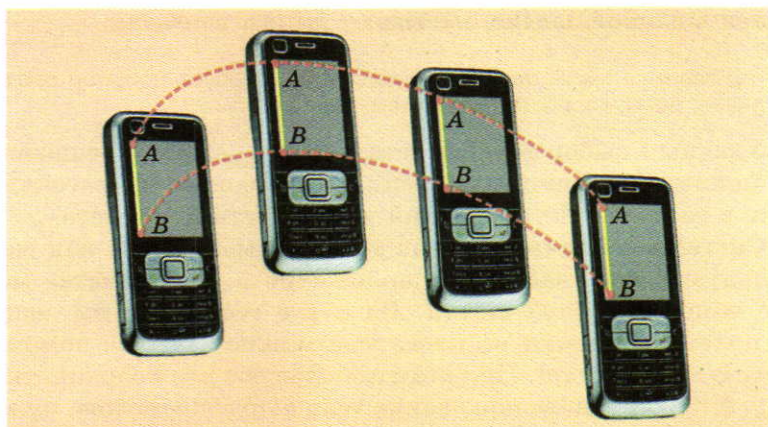


Рис. 1.5. Пример поступательного движения

Движение телефона можно полностью описать, следя только за одной его точкой, например точкой *A*, так как все точки телефона движутся *одинаково*; сравните, например, движение точек *A* и *B*. Обратите внимание: отрезок *AB* при этом остается во время движения *параллельным самому себе*.

Движение тела, при котором отрезок, соединяющий две *любые* точки тела, остается параллельным самому себе, называют *поступательным*.

Подведем итог:

тело можно считать материальной точкой, если его размеры малы по сравнению с расстоянием, пройденным телом, или если тело движется поступательно.

? Приведите пример задачи, в которой спортсмена можно рассматривать как материальную точку, и пример задачи, в которой его нельзя рассматривать как материальную точку.

Приведите примеры поступательного и непоступательного движения.

3. СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Тело отсчета. Изучая движение автомобиля, обычно рассматривают его движение относительно Земли, а изучая движение самой Земли — ее движение относительно Солнца.

Тело, по отношению к которому рассматривают движение тел в данной задаче, называют *телом отсчета*.

? Что является телом отсчета для пассажира автобуса, когда он рассматривает дома, «пробегающие» мимо окна автобуса?

Удачный выбор тела отсчета может оказаться решающим для понимания причин движения тел. Об этом мы расскажем ниже в разделе «Исторический выбор системы отсчета».

Система координат. Когда тело рассматривают как материальную точку, задать его положение в пространстве можно с помощью *одной точки*. Из курса геометрии вы знаете, что положение точки на плоскости можно задать с помощью *системы координат*. При этом используют две координаты — x и y . А чтобы задать положение тела в *пространстве*, нужны *три* координаты — x , y и z .

Часы. Движение тела — это изменение положения тела с течением *времени*. Поэтому для описания движения нужны также *часы*.

Тело отсчета, связанные с ним система координат и часы образуют *систему отсчета*.

Указывая систему отсчета, часто для краткости называют только тело отсчета, с которым связана эта система. Например, говорят: «система отсчета, связанная с Землей» или «система отсчета, связанная с Солнцем».

4. ТРАЕКТОРИЯ И ПУТЬ

При своем движении тело (рассматриваемое как материальная точка) описывает некоторую линию в пространстве.

Линию в пространстве, вдоль которой движется тело, называют *траекторией движения тела*.

Например, летящий высоко в небе самолет оставляет за собой след (рис. 1.6), который является траекторией движения самолета *относительно Земли*. Но чаще траектория движения тела невидима.

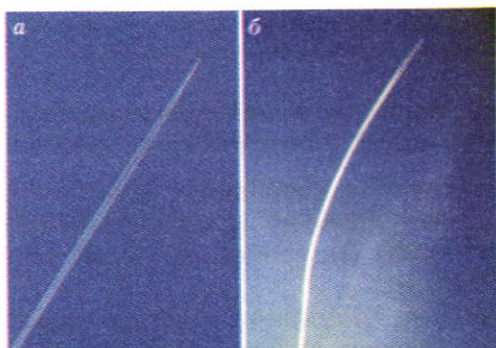


Рис. 1.6. Видимая траектория движения самолета относительно Земли: *а* — траектория самолета прямолинейная; *б* — траектория самолета криволинейная

Если траектория тела является отрезком прямой, движение называют *прямолинейным* (рис. 1.6, *а*). Если же траектория тела — кривая линия, движение называют *криволинейным* (рис. 1.6, *б*).

Важный частный случай криволинейного движения — *движение по окружности* (рис. 1.7).

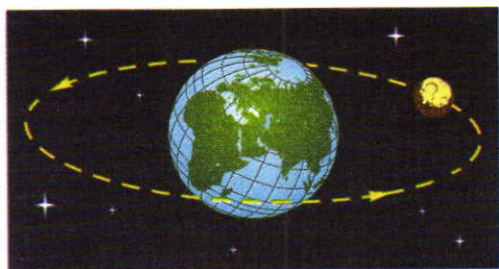


Рис. 1.7. Траекторию движения Луны вокруг Земли приближенно можно считать окружностью

Если конечное положение тела совпадает с начальным, траекторию движения называют *замкнутой*. Например, если человек утром вышел из дома и вечером вернулся домой, траектория его движения относительно Земли замкнута.

Поскольку движение относительно, *траектория движения тела зависит от выбора системы отсчета*.

? С полки вагона едущего поезда падает мяч. В какой системе отсчета движение мяча прямолинейное? криволинейное?

Длину траектории движения тела называют *путем*, пройденным телом (или, для краткости, просто путем).

Путь обозначают l и измеряют в единицах длины — метрах (м). Используют также дольные и кратные единицы: миллиметр ($1\text{ мм} = 0,001\text{ м}$), сантиметр ($1\text{ см} = 0,01\text{ м}$) и километр ($1\text{ км} = 1000\text{ м}$).

Путь равен сумме длин всех участков траектории и в том случае, когда некоторые участки траектории накладываются друг на друга, как, например, это происходит при движении по окружности.

? Автомобиль дважды проехал по Московской кольцевой автомобильной дороге длиной 110 км. Чему равен пройденный им путь?

Если за любые равные промежутки времени тело проходит равные пути, движение тела называют *равномерным*.

Равномерное движение может быть как *прямолинейным*, так и *криволинейным*.

В этом году мы подробно рассмотрим *прямолинейное равномерное движение* и *равномерное движение по окружности* (таким приближенно можно считать движение Луны вокруг Земли и движение планет вокруг Солнца).

5. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Пусть нам известно, что самолет вылетел из Москвы и пролетел путь, равный 1000 км. Достаточно ли этого, чтобы определить новое положение самолета?

Нет, конечно: ведь мы не знаем, в каком направлении летел самолет, была его траектория прямолинейной или криволинейной. Самолет мог даже сделать круг и вернуться в Москву — это тоже не противоречит тому, что он пролетел 1000 км!

Для того чтобы однозначно определить положение тела в любой момент времени, вводят физическую величину, которая характеризуется *числовым значением и направлением*.

Рассмотрим для примера движение автомобиля, схематически показанное на рис. 1.8. Пусть за некоторый промежуток времени автомобиль переместился из точки 1 в точку 2.

Направленный отрезок, проведенный из точки 1 в точку 2, называют *перемещением* автомобиля за указанный промежуток времени.



Рис. 1.8. Перемещение автомобиля, проехавшего из положения 1 в положение 2

Величины, которые подобно перемещению характеризуются числовым значением и направлением, называют *векторными*. При изучении механики мы встретимся и с другими векторными величинами, например, скоростью и силой.

Числовое значение векторной величины называют *модулем* этой величины. Обозначают векторную величину буквой со стрелкой: например, перемещение обозначают \vec{s} . Модуль вектора обозначают той же буквой, но без стрелки: например, модуль перемещения обозначают s .

На чертежах векторные величины изображают стрелками.

Величины, которые характеризуются только числовым значением, называют *скалярными*. Примерами скалярных величин являются путь и время.

6. СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ

Пусть самолет перелетел из города М в город Н, а оттуда — в город К. На рис. 1.9, а вектором \vec{s}_1 обозначено перемещение самолета из М в Н, а вектором \vec{s}_2 — перемещение самолета из Н в К. Результатом двух перемещений является перемещение \vec{s} — это вектор, соединяющий М и К.

Мы выполнили сейчас *сложение векторов* по правилу треугольника.

Чтобы согласно этому правилу найти сумму двух векторов, надо начало второго вектора совместить с концом первого вектора (рис. 1.9, а). Тогда суммой этих двух векторов является вектор, начало которого совпадает с началом первого вектора, а конец — с концом второго вектора (рис. 1.9, б).

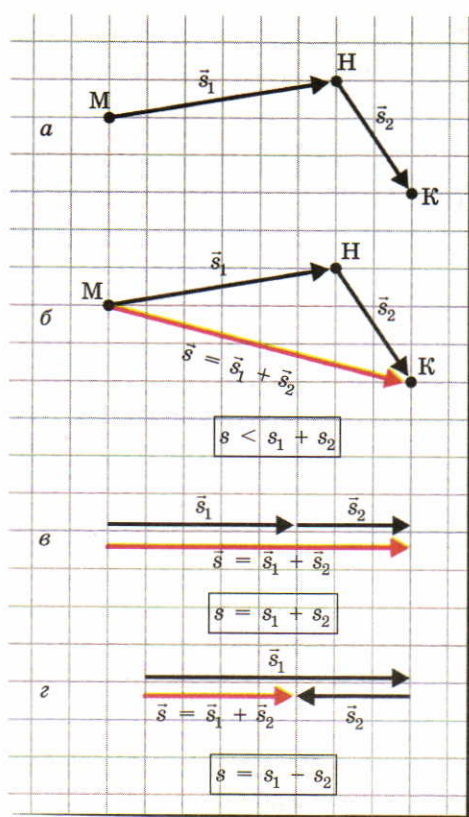


Рис. 1.9. Сложение векторов по правилу треугольника: а, б — векторы-слагаемые направлены под углом; в — векторы-слагаемые направлены одинаково; г — векторы-слагаемые направлены противоположно

С помощью правила треугольника можно складывать также векторы, направленные вдоль одной прямой (рис. 1.9, в, г). Правда, в этом случае получается не настоящий треугольник, так как векторы лежат на одной прямой.

Обратите внимание: равенство $s = s_1 + s_2$ имеет место только тогда, когда векторы-слагаемые направлены одинаково (рис. 1.9, в). Если же векторы-слагаемые направлены противоположно, то $s = |s_1 - s_2|$ (рис. 1.9, г).

? Как движется тело, если модуль перемещения равен пути, пройденному телом?

Какова траектория движения тела, если его перемещение равно нулю, а путь нулю не равен?



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

7. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Всем с детства знакомо вращение юлы (рис. 1.10, а). Если быстро раскрутить юлу, все ее точки будут двигаться по окружностям разных радиусов. Центры всех этих окружностей при этом лежат на одной прямой, называемой *осью вращения*. Такое движение называют *вращательным*.

Другой пример вращательного движения — суточное вращение Земли (рис. 1.10, б).

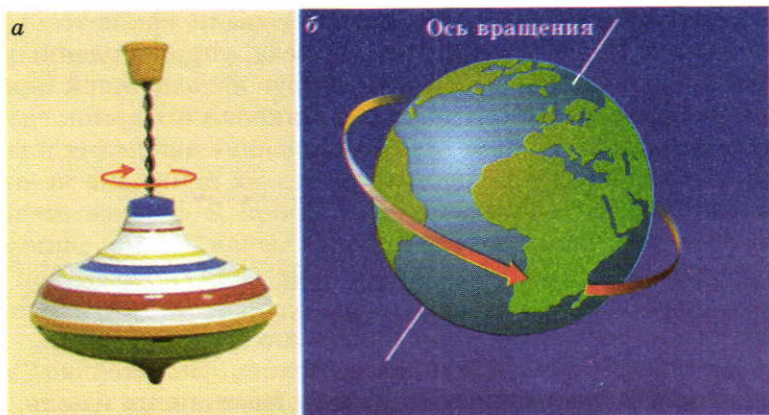


Рис. 1.10. Вращательное движение

? Какие части вращающегося колеса обозрения (рис. 1.11) движутся поступательно, а какие совершают вращательное движение?



Рис. 1.11. Колесо обозрения

8. ИСТОРИЧЕСКИЙ ВЫБОР СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Как вы знаете, долгое время (в течение тысячелетий!) движение *всех* тел, в том числе и небесных — Солнца, Луны, планет и звезд, рассматривали только относительно *Земли*, потому что Землю считали центром Вселенной. Это представление об устройстве мира называют *геоцентрической системой*.

Движение Солнца и Луны в системе отсчета, связанной с Землей, выглядело довольно простым, а вот движение планет выглядело весьма сложным: они описывали какие-то странные петли на фоне «неподвижных» звезд, «прикрепленных» к небесному своду, вращающемуся вокруг неподвижной Земли.

В 16-м веке польский астроном Николай Коперник сделал важное открытие: он заметил, что описание движения планет очень упрощается, если рассматривать их движение не относительно Земли, а относительно *Солнца*! В системе отсчета, связанной с Солнцем, все планеты (включая Землю) движутся по орбитам, близким к круговым (рис. 1.12). Это — так называемая *гелиоцентрическая система мира*. Она изменила представление человека о Вселенной и о его месте в ней.

Общий характер движения всех планет относительно Солнца навел английского ученого Исаака Ньютона на мысль, что общей причиной такого движения планет является их *притяжение к Солнцу*. Это привело ученого к открытию закона всемирного тяготения (см. § 10. Закон всемирного тяготения).

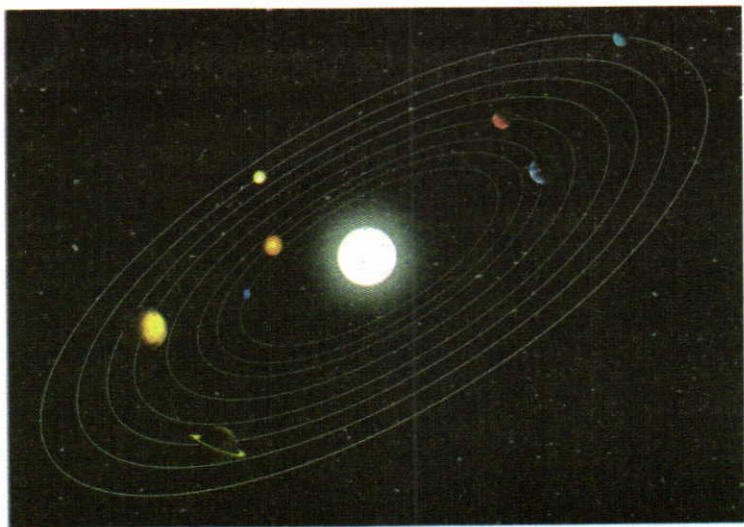


Рис. 1.12. Гелиоцентрическая система мира, предложенная Коперником (масштаб на рисунке не соблюден)

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Механика изучает движение и взаимодействие тел.
- Движение относительно: говорить о движении любого тела можно только по отношению к какому-то другому телу. Механическим движением называют изменение со временем положения тела в пространстве относительно других тел.
- Физическую модель тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, называют материальной точкой. Тело можно считать материальной точкой, если размеры тела малы по сравнению с расстоянием, пройденным телом, или тело движется поступательно.
- Тело, по отношению к которому рассматривают движение тел в данной задаче, называют телом отсчета. Тело отсчета, связанные с ним система координат и часы образуют систему отсчета.
- Линию в пространстве, вдоль которой движется тело, называют траекторией движения тела. Траектория движения тела зависит от выбора системы отсчета. Длину траектории движения тела называют путем, пройденным телом.

- Если за любые равные промежутки времени тело проходит равные пути, движение тела называют равномерным. Равномерное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным.
- Перемещением тела за данный промежуток времени называют направленный отрезок, соединяющий положение тела в начальный момент этого промежутка времени с положением тела в конечный момент этого промежутка времени. Перемещение является вектором.
- Векторы можно складывать по правилу треугольника.
- В предложенной Коперником гелиоцентрической системе мира все планеты, включая Землю, движутся вокруг Солнца.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Приведите примеры, иллюстрирующие относительность движения.
2. Приведите примеры тел, которые сейчас покоятся относительно вас, и примеры тел, которые движутся относительно вас.
3. В задаче спрашивается, сколько времени поезд ехал из одного города до другого. Можно ли в такой задаче считать поезд материальной точкой?
4. В задаче спрашивается, сколько времени поезд двигался по мосту. Можно ли в такой задаче считать поезд материальной точкой?
5. Из чего состоит система отсчета? Приведите примеры различных систем отсчета.
6. Может ли траектория движения тела пересекать саму себя? Подтвердите свой ответ примером.
7. В каком случае траекторию называют замкнутой?

Второй уровень

8. Является ли движение автомобиля на повороте поступательным? Обоснуйте свой ответ.
9. Какую систему мира называют геоцентрической, а какую — гелиоцентрической? Кто предложил гелиоцентрическую систему мира?

10. Приведите пример движения тела, при котором положение тела в любой момент времени можно задать с помощью только одной, только двух и всех трех координат.
11. Зависит ли траектория движения тела от выбора системы отсчета? Подтвердите свой ответ примером.
12. Корабль точно за год совершил кругосветное путешествие и вернулся в порт отправления. В какой системе отсчета траектория его движения замкнута? Будет ли она замкнутой в системе отсчета, связанной с Солнцем?
13. Приведите пример равномерного криволинейного движения.
14. Два автомобиля проехали из города А в город Б. Первый автомобиль проехал 200 км, а второй — 240 км. Могли ли оба автомобиля двигаться прямолинейно в одном направлении? Обоснуйте свой ответ.
15. Турист прошел 3 км на север, а после этого 4 км на восток. Изобразите схематически общее перемещение туриста. Чему равен модуль перемещения?
16. В чем состоит главное преимущество гелиоцентрической системы мира по сравнению с геоцентрической?
17. Составьте задачу по теме «Механическое движение», ответ у которой был бы: «Движение по окружности».

§ 2.

СКОРОСТЬ И ПУТЬ

1. Скорость прямолинейного равномерного движения
2. График зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении
3. График зависимости модуля скорости от времени при равномерном движении
4. Средняя скорость неравномерного движения
5. Мгновенная скорость
- 6. Как определяют мгновенную скорость?
- 7. Путь при неравномерном движении

1. СКОРОСТЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

В курсе физики 7-го класса вы уже познакомились с прямолинейным равномерным движением. Напомним, что

прямолинейным равномерным движением называют такое движение тела, при котором оно за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.

Например, таким является движение автомобиля по прямому шоссе, когда стрелка спидометра (прибора, указывающего скорость автомобиля) «застывает» в одном и том же положении.

Прямолинейное равномерное движение является самым простым для изучения. Природа тоже любит простоту: как мы скоро увидим, тело движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела.

Скоростью \vec{v} прямолинейного равномерного движения называют физическую величину, равную отношению перемещения \vec{s} к промежутку времени t , за который произошло это перемещение:

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

Как видно из определения, *скорость является векторной величиной*. Направление скорости \vec{v} совпадает с направлением перемещения \vec{s} , а модуль скорости

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

где s — модуль перемещения.

В случае прямолинейного равномерного движения модуль перемещения s совпадает с путем l , поэтому в этом случае можно записать, что $v = \frac{l}{t}$.

Единица скорости в СИ — $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Это скорость неторопливой прогулки. Идя с такой скоростью, человек за 1 ч проходит 3600 м, то есть его скорость равна 3,6 км/ч. Скорость автомобилей и поездов задают обычно в километрах в час.

? Хороший спортсмен пробегает стометровку за 10 с. Какова его скорость в метрах в секунду и в километрах в час?

Автомобиль едет со скоростью 20 м/с. Какова его скорость в километрах в час?

Скорость ракет и искусственных спутников Земли задают обычно в километрах в секунду $\left(\frac{\text{км}}{\text{с}}\right)$. Как мы увидим в § 10. Закон всемирного тяготения, скорость искусственного спутника Земли на околоземной орбите составляет около 8 км/с.

2. ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ ПУТИ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

График показывает зависимость одной величины от другой намного нагляднее, чем формула. Построим график зависимости пути от времени для прямолинейного равномерного движения.

Из формулы $v = \frac{l}{t}$ следует, что $l = vt$. Это — формула *прямой пропорциональности*, хорошо знакомая вам из курса математики. Графиком прямой пропорциональности является *отрезок прямой*, проходящий через начало координат. Следовательно,

график зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении — отрезок прямой, один конец которого совпадает с началом координат.

Для построения такого графика достаточно найти одну его точку, не совпадающую с началом координат, и провести отрезок прямой через начало координат и эту точку. Рассмотрим пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Построим графики зависимости пути от времени для грузовика и легкового автомобиля, движущихся прямолинейно и равномерно, если скорость грузовика

$10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а скорость легкового авто-

мобиля $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Решение. Построим для каждого графика точку, соответствующую моменту времени $t = 1$ с (зеленая точка для грузовика и красная для легкового автомобиля на рис. 2.1). Проведем отрезки прямых через начало координат и эти точки. Эти отрезки и есть искомые графики.

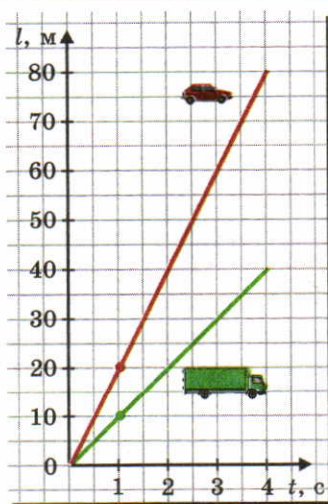


Рис. 2.1. К решению задачи

Обратите внимание:

чем больше скорость тела, тем больше угол между графиком зависимости пути от времени и осью времени.

3. ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ СКОРОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

При прямолинейном равномерном движении модуль скорости тела остается постоянным. Поэтому

при прямолинейном равномерном движении графиком зависимости модуля скорости от времени является *отрезок прямой, параллельной оси времени*.

На рис. 2.2 изображены для примера графики зависимости модуля скорости от времени для рассмотренных выше грузовика и легкового автомобиля.

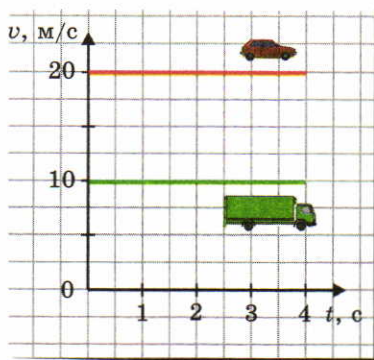


Рис. 2.2. Графики зависимости модуля скорости от времени для легкового автомобиля и грузовика

График зависимости модуля скорости от времени для прямолинейного равномерного движения может показаться малоинтересным. Однако у него есть замечательное свойство, которое поможет нам в дальнейшем. Вот это свойство:

площадь фигуры под графиком модуля скорости численно равна пути, пройденному телом.

Для доказательства рассмотрим фигуру, заключенную под графиком модуля скорости (она выделена цветом на рис. 2.3).

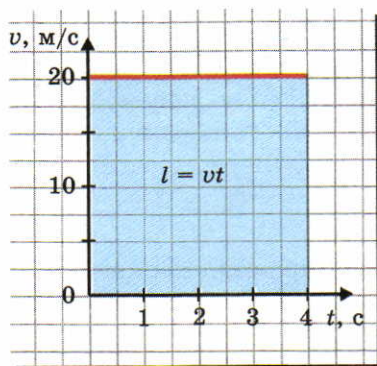


Рис. 2.3. Путь численно равен площади фигуры под графиком зависимости модуля скорости от времени

Эта фигура — прямоугольник. Его площадь равна произведению высоты v на основание t , то есть равна vt . А это как раз и есть выражение для пути, пройденного телом при прямолинейном равномерном движении, потому что $l = vt$. Доказательство завершено.

Ниже мы покажем, что это свойство остается справедливым и тогда, когда скорость тела *изменяется со временем* (см. «Путь при неравномерном движении»). Это поможет нам найти путь, пройденный телом, при движении с изменяющейся скоростью.

4. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

Прямолинейное равномерное движение встречается довольно редко. Значительно чаще мы наблюдаем примеры неравномерного движения.

Неравномерным движением называют такое движение, при котором тело проходит за равные промежутки времени *разные* пути.

Примерами неравномерного движения могут служить падение яблока с ветки дерева, разгон и торможение автомобиля.

Для описания неравномерного движения часто используют среднюю скорость.

Средней скоростью неравномерного движения $\vec{v}_{\text{ср}}$ за данный промежуток времени t называют физическую величину, равную отношению перемещения \vec{s} к промежутку времени, за который это перемещение произошло:

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

Слова «за данный промежуток времени» указывают на то, что *при неравномерном движении средняя скорость тела за разные промежутки времени может быть различной.*

Например, когда автомобиль разгоняется, то его средняя скорость за первую секунду может быть равна 5 м/с, а за вторую секунду уже 10 м/с. А для тормозящего автобуса, наоборот, средняя скорость за каждую последующую секунду меньше, чем за предыдущую.

Если тело движется прямолинейно в одном направлении, то пройденный телом путь $l = s$. Поэтому в таком случае модуль средней скорости $v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$.

5. МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ

Когда говорят, что *скорость тела изменяется*, имеют в виду *мгновенную скорость*, то есть скорость тела в данный момент. В дальнейшем, говоря о скорости тела, мы будем иметь в виду его мгновенную скорость.

Наглядное представление о мгновенной скорости автомобиля дают, например, показания *спидометра* (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Спидометр — прибор, указывающий мгновенную скорость автомобиля

Наблюдая за спидометром во время езды, можно заметить, что скорость автомобиля *изменяется со временем*. Особенно это заметно при разгоне (например, при трогании с места) и торможении (например, перед перекрестком).

Подробнее о мгновенной скорости рассказано в разделе «Как определяют мгновенную скорость?».

? На рис. 2.5 приведен график зависимости модуля скорости от времени для автомобиля, едущего по городу. В какие промежутки времени скорость автомобиля увеличивалась? уменьшалась? оставалась постоянной? Соблюдал ли водитель правила дорожного движения, согласно которым скорость при движении в городе не должна превышать 60 км/ч?

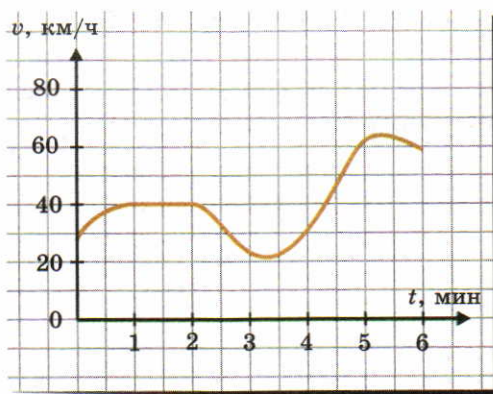


Рис. 2.5. К задаче



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

6. КАК ОПРЕДЕЛЯЮТ МГНОВЕННУЮ СКОРОСТЬ?

Будем измерять среднюю скорость неравномерно движущегося автомобиля за все меньший и меньший промежуток времени: сначала за 1 мин, потом за 10 с, за 1 с и так далее.

При уменьшении промежутка времени средняя скорость за рассматриваемый промежуток будет изменяться. Но когда этот промежуток времени станет достаточно малым (скажем, для автомобиля меньше 0,1 с), то при дальнейшем уменьшении промежутка времени средняя скорость будет оставаться практически неизменной. Это означает, что в течение такого малого промежутка времени движение тела приближенно

можно считать равномерным. Скорость этого равномерного движения и принимают за мгновенную скорость тела в данный момент времени.

Таким образом,

мгновенная скорость тела в данный момент — это его средняя скорость за настолько малый промежуток времени (включающий этот момент), что в течение этого промежутка движение тела можно считать равномерным.

7. ПУТЬ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

Выполним обещанное выше: докажем, что и при неравномерном движении

площадь фигуры под графиком модуля скорости численно равна пути, пройденному телом.

Пусть, например, график зависимости модуля скорости от времени имеет вид, изображенный на рис. 2.6, а.

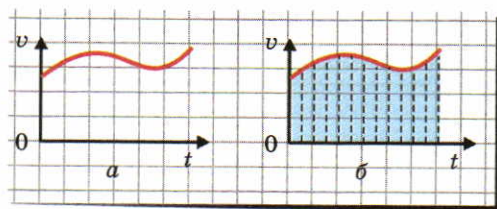


Рис. 2.6. При неравномерном движении пройденный путь также численно равен площади под графиком скорости

Разобьем мысленно все время движения на столь малые промежутки времени, чтобы в течение каждого из них движение тела можно было считать практически равномерным (рис. 2.6, б). Как мы уже знаем, для каждого такого промежутка путь численно равен площади под соответствующим участком графика.

Путь, пройденный за все время движения, равен сумме путей, пройденных за все малые промежутки времени, а площадь под всем графиком равна сумме площадей под всеми участками графика. Следовательно, весь путь равен площади под всем графиком зависимости модуля скорости от времени. Доказательство завершено.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Прямолинейным равномерным движением называют такое движение тела, при котором оно за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.
- Скоростью \vec{v} прямолинейного равномерного движения называют физическую величину, равную отношению перемещения \vec{s} к промежутку времени t , за который произошло это перемещение: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$. Скорость является векторной величиной.
- В случае прямолинейного равномерного движения $v = \frac{l}{t}$.
- Графиком зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении является отрезок прямой, один конец которого совпадает с началом координат. Чем больше скорость тела, тем больше угол между графиком зависимости пути от времени и осью времени.
- При прямолинейном равномерном движении графиком зависимости модуля скорости от времени является отрезок прямой, параллельной оси времени.
- Площадь фигуры под графиком модуля скорости численно равна пути, пройденному телом.
- Неравномерным движением называют такое движение, при котором тело проходит за равные промежутки времени разные пути.
- Средней скоростью неравномерного движения $\vec{v}_{\text{ср}}$ за данный промежуток времени t называют физическую величину, равную отношению перемещения \vec{s} к промежутку времени, за который это перемещение произошло: $\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}$.
- Если тело движется прямолинейно в одном направлении, то модуль средней скорости $v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$, где l — путь, пройденный телом.
- Мгновенная скорость тела в данный момент — это его средняя скорость за настолько малый промежуток времени, включающий этот момент, что в течение этого промежутка движение тела можно считать равномерным.



Первый уровень

1. Приведите примеры прямолинейного равномерного движения.
2. Автомобиль движется прямолинейно равномерно по прямому шоссе. Какова скорость автомобиля, если через каждую минуту он проезжает мимо километрового столба?
3. Постройте на одном чертеже графики зависимости пути от времени для двух автомобилей — синего и красного. Синий движется со скоростью 60 км/ч, а красный — со скоростью 100 км/ч. Для какого автомобиля угол между графиком и осью времени больше?
4. Что такое неравномерное движение? Приведите несколько примеров такого движения.
5. Что такое средняя скорость? Как связан модуль средней скорости с путем при прямолинейном движении в одном направлении?
6. Автомобиль за 1 ч проехал 60 км, потом 1 ч стоял, после этого за 1 ч проехал еще 90 км. Какова средняя скорость автомобиля?
7. Что такое мгновенная скорость? С помощью какого прибора измеряют мгновенную скорость автомобиля?

Второй уровень

8. Почему скорость является векторной величиной? Как направлена скорость?
9. Какие вы знаете формулы для модуля скорости?
10. Первый ученик, решая задачу, нашел скорость автомобиля в метрах в секунду, а второй — в километрах в час. У кого из них получилось большее число? Во сколько раз?
11. Какой вид имеет график зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении? Изобразите такие графики для двух автомобилей, скорость одного из которых в 2 раза больше скорости другого.
12. Какой вид имеет график зависимости модуля скорости от времени при прямолинейном равномерном движении? Как можно найти пройденный путь с помощью графика скорости?

¹ В заданиях к этому параграфу предполагается, что тело движется в одном направлении.

13. На рис. 2.7 изображен график зависимости модуля скорости от времени для автомобиля. Чему равен путь, пройденный им за 2 ч? за 4 ч? за 6 ч?

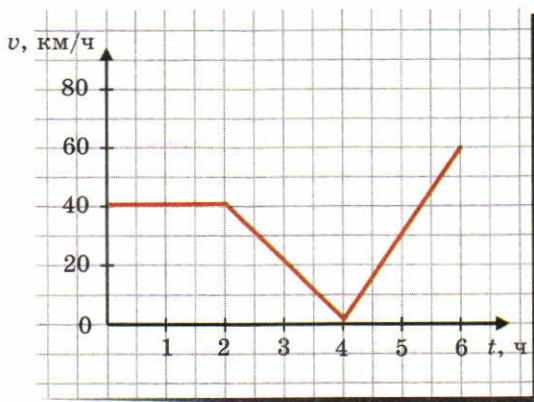


Рис. 2.7. К заданию 13

14. Человек проехал половину времени на автомобиле со скоростью 100 км/ч, а половину времени — на поезде со скоростью 60 км/ч. Чему равна его средняя скорость за все время движения? Движение считайте прямолинейным.
15. Человек проехал первую половину пути на автомобиле со скоростью 100 км/ч, а вторую половину пути — на поезде со скоростью 60 км/ч. Чему равна его средняя скорость за все время движения? Движение считайте прямолинейным. Почему ответ этой задачи отличается от ответа предыдущей задачи?
16. Составьте задачу по теме «Средняя скорость», ответ у которой был бы: «50 км/ч».

§ 3.

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

1. Прямолинейное равноускоренное движение
2. Ускорение
3. Когда скорость тела увеличивается, а когда — уменьшается?
4. График зависимости модуля скорости от времени

1. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Еще древние греки заметили, что *при падении скорость тела увеличивается*. Вы тоже можете легко убедиться в этом.



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Отпустите мяч так, чтобы он упал на ногу. Чувствуете: чем с большей высоты падает мяч, тем сильнее он ударяет по ноге. Значит, *скорость мяча при падении увеличивается*.

Древние греки не догадались, что для изучения природы *наблюдений* недостаточно. Мало заметить, что скорость тела при падении увеличивается: надо *измерить на опыте*, как она увеличивается!

Первым смог это сделать уже знакомый нам Г. Галилей. Произошло это в 16-м веке.

У Галилея, так же как и у древних греков, не было точных приборов для измерения времени: у него были только водяные часы. Но Галилей догадался, что падение тела можно существенно «замедлить», заменив его *скатыванием шара с наклонной плоскости*.

На рис. 3.1 схематически изображены последовательные положения скатывающегося шара через *равные* промежутки времени. Мы видим, что за эти промежутки времени шар проходит *разные* расстояния. Значит, движение шара — *неравномерное*.

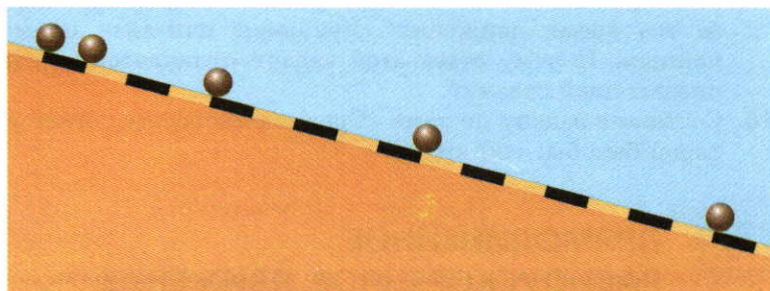


Рис. 3.1. Последовательные положения скатывающегося шара через равные промежутки времени

С помощью искусно поставленных опытов и вычислений Галилей установил, что скорость скатывающегося шара за любые равные промежутки времени *изменяется* на одну и ту же величину.

Прямолинейное движение, при котором за любые равные промежутки времени скорость тела изменяется на одну и ту же величину, называют *прямолинейным равноускоренным движением*.

Равноускоренным движением является скатывание шара по наклонной плоскости. Равноускоренным движением является и падение тела, если сопротивлением воздуха можно пренебречь.

Приближенно равноускоренным можно считать движение разгоняющегося автомобиля и, как мы скоро увидим, тормозящего тоже!

2. УСКОРЕНИЕ

Если начальная скорость тела равна нулю, то при прямолинейном равноускоренном движении *модуль скорости тела пропорционален времени движения*. Поэтому можно записать

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

Векторную величину \vec{a} в этой формуле называют *ускорением*. Ускорение показывает, как быстро изменяется скорость тела:

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

Если тело имеет начальную скорость \vec{v}_0 , то при равноускоренном движении зависимость скорости тела от времени имеет вид

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

Отсюда $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Поэтому в общем случае

ускорением \vec{a} называют векторную величину, равную отношению изменения скорости тела $\vec{v} - \vec{v}_0$ к промежутку времени t , за который это изменение произошло:

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

Единица ускорения. Единицей ускорения в СИ является $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ (читают «метр в секунду за секунду» или «метр на секунду

в квадрате»). Если тело движется с таким ускорением без начальной скорости, то скорость тела каждую секунду увеличивается на 1 м/с.

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

С помощью своих опытов Галилей установил, что

при падении телá движутся равноускоренно, если можно пренебречь сопротивлением воздуха.

Падение в условиях, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь, называют *свободным падением*. В дальнейшем, рассматривая падение тел, мы будем считать его свободным падением.

Измерения показали, что

при свободном падении модуль ускорения тела равен $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, причем для всех тел ускорение одинаково.

Это удивительное общее свойство падения тел помогло И. Ньютону открыть закон всемирного тяготения (см. § 10. Закон всемирного тяготения).

Ускорение тел при свободном падении называют *ускорением свободного падения* и обозначают \vec{g} . Для упрощения расчетов часто принимают $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Мы тоже будем так поступать, не оговаривая этого особо.

Если тело свободно падает из состояния покоя, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой

$$v = gt.$$

? Чему равна скорость свободно падающего тела через 1 с после начала падения?

Через какое время после начала падения скорость свободно падающего тела равна скорости автомобиля, движущегося со скоростью 72 км/ч?

3. КОГДА СКОРОСТЬ ТЕЛА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, А КОГДА — УМЕНЬШАЕТСЯ?

До сих пор мы рассматривали случаи прямолинейного равноускоренного движения, когда скорость тела по модулю увеличивается. Но она может и уменьшаться (при этом движение называют тоже *равноускоренным!*). Рассмотрим под-

робнее, в каких случаях скорость тела увеличивается, а в каких — уменьшается.

СКОРОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ

Если ускорение \vec{a} направлено так же, как начальная скорость \vec{v}_0 , то векторные величины \vec{v}_0 и $\vec{a}t$ направлены одинаково. Сложение векторных величин в этом случае показано на рис. 3.2. При этом $v = v_0 + at$, то есть скорость v в момент времени t больше начальной скорости. Это означает, что скорость тела *увеличивается* со временем.

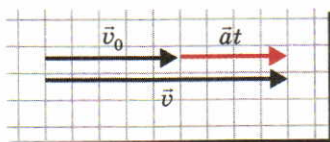


Рис. 3.2. Если направление ускорения совпадает с направлением начальной скорости, то скорость тела увеличивается

Итак,

если направление ускорения тела совпадает с направлением начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой

$$v = v_0 + at.$$

? Автомобиль, едущий со скоростью 10 м/с, начал разгоняться. Какой станет его скорость через 5 с, если ускорение автомобиля 1 м/с²?

СКОРОСТЬ УМЕНЬШАЕТСЯ

Если ускорение \vec{a} направлено противоположно начальной скорости \vec{v}_0 , то векторные величины \vec{v}_0 и $\vec{a}t$ направлены противоположно. Сложение векторных величин в этом случае показано на рис. 3.3. При этом $v = v_0 - at$, то есть скорость v в момент времени t меньше начальной скорости. Это означает, что скорость тела *уменьшается* со временем.

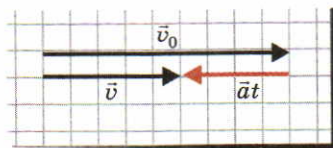


Рис. 3.3. Если ускорение направлено противоположно начальной скорости, скорость тела уменьшается

Итак,

если ускорение тела направлено противоположно начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой

$$v = v_0 - at.$$

Равноускоренное движение с *уменьшающейся* скоростью может продолжаться только до тех пор, пока скорость тела v не станет равной нулю. Время движения тела до остановки можно найти из условия $v_0 - at = 0$. Отсюда

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

Рассмотрим пример.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

При подъеме тела его скорость уменьшается согласно формуле $v = v_0 - gt$, где g — модуль ускорения свободного падения. Следовательно, скорость станет равной нулю через время $t_{\text{под}} = \frac{v_0}{g}$. Достигнув высшей точки, тело на мгновение остановится и начнет двигаться вниз с ускорением свободного падения. Скорость тела при движении вниз будет увеличиваться согласно формуле $v = gt$, где время t отсчитывается теперь от момента, когда тело находилось в высшей точке.

? Мяч бросили вертикально вверх со скоростью 10 м/с. Через какое время мяч достигнет высшей точки?

4. ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯ СКОРОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ

Формулы $v = v_0 + at$ и $v = v_0 - at$ выражают *линейную* зависимость модуля скорости от времени. А графиком линейной функции, как вы знаете из курса математики, является *отрезок прямой*. Таким образом,

при прямолинейном равноускоренном движении график зависимости модуля скорости от времени — отрезок прямой.

Чтобы построить такой график, достаточно найти две принадлежащие ему точки и провести через них отрезок прямой.

Рассмотрим на примерах, как построить график зависимости модуля скорости от времени и какую информацию о движении тела можно получить, изучая такой график.



РЕШИМ ЗАДАЧИ

1. Построим график зависимости от времени модуля скорости свободно падающего тела, если: а) начальная скорость тела равна нулю; б) начальная скорость тела направлена вниз и равна $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Решение. Найдем по две точки для каждого графика — соответствующую начальному моменту времени и соответствующую моменту времени $t = 1 \text{ с}$.

В случае а) зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = gt$, поэтому при $t = 0 \text{ с}$ скорость тела равна нулю, а при $t = 1 \text{ с}$ скорость тела равна $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. (Соответствующие точки графика обозначены красным на рис. 3.4.)

В случае б) зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = v_0 + gt$, где $v_0 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Поэтому при $t = 0 \text{ с}$ скорость тела равна $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а при $t = 1 \text{ с}$ скорость тела $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. (Соответствующие точки графика обозначены зеленым на рис. 3.4.)

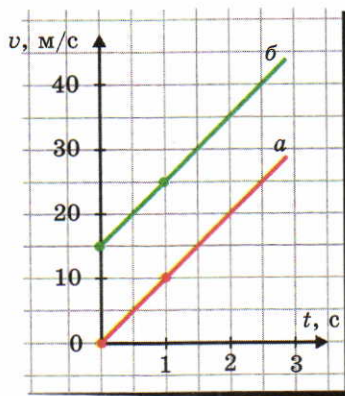


Рис. 3.4. Графики зависимости модуля скорости от времени для прямолинейного равноускоренного движения: а — без начальной скорости; б — с начальной скоростью

Проводя через найденные точки отрезки прямых, получаем искомые графики (см. рис. 3.4).

Построенные графики оказались *параллельными отрезками*. Обусловлено это тем, что тела двигались с *одинаковым ускорением*.

2. По прямому шоссе в одном направлении едут три автомобиля — красный, синий и зеленый. На рис. 3.5 теми же цветами изображены графики зависимости модуля скорости от времени для этих автомобилей. Движение какого (каких) автомобиля было равноускоренным? Как при этом направлено ускорение — в направлении начальной скорости или противоположно ей? Чему равен модуль ускорения?

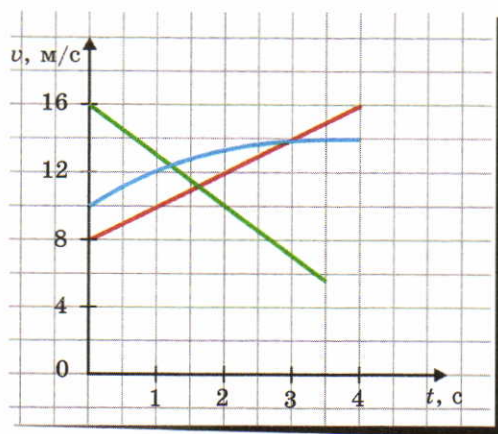


Рис. 3.5. Какие из этих графиков соответствуют равноускоренному движению?

Решение. Графики являются отрезками прямых только для красного и зеленого автомобилей. Следовательно, только эти автомобили движутся равноускоренно.

Скорость красного автомобиля увеличивается, значит, его ускорение направлено так же, как начальная скорость. А скорость зеленого автомобиля уменьшается — значит, его ускорение направлено противоположно начальной скорости.

По графику видно, что скорость красного автомобиля за 1 с увеличилась на $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Значит, модуль ускорения этого автомобиля

$a_{\text{кр}} = \frac{2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ с}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Скорость же зеленого автомобиля за 2 с уменьшилась на $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Значит, модуль ускорения этого автомобиля $a_{\text{зел}} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

Ответ: равноускоренно движутся красный и зеленый автомобили; ускорение красного автомобиля направлено в ту же сторону, что и начальная скорость, а ускорение зеленого — противоположно начальной скорости; модули ускорений этих автомобилей равны соответственно 2 и $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Прямолинейное движение, при котором за любые равные промежутки времени скорость тела изменяется на одну и ту же величину, называют прямолинейным равноускоренным движением.
- Ускорением \vec{a} называют векторную величину, равную отношению изменения скорости тела $\vec{v} - \vec{v}_0$ к промежутку времени t , за который это изменение произошло: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$.
- Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, падающее тело движется равноускоренно. Такое падение называют свободным. При свободном падении модуль ускорения тела равен $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, причем для всех тел ускорение одинаково.
- Если направление ускорения тела совпадает с направлением начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = v_0 + at$. Если ускорение тела направлено противоположно начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = v_0 - at$.
- При прямолинейном равноускоренном движении графиком зависимости модуля скорости от времени является отрезок прямой.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Какое движение называют прямолинейным равноускоренным? Приведите пример такого движения.
2. Что такое ускорение?
3. Как зависит модуль скорости от времени при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости? с начальной скоростью?
4. Автомобиль движется прямолинейно равноускоренно в одном направлении. За 6 с скорость автомобиля увеличилась на 12 м/с. С каким ускорением он движется?
5. Чему равно ускорение свободного падения?
6. Чему равна скорость свободно падающего тела через 3 с после начала падения? Начальная скорость тела равна нулю.
7. Как направлено ускорение тела, брошенного вертикально вверх, во время подъема? во время спуска?
8. Постройте график зависимости модуля скорости от времени для автомобиля, который движется прямолинейно равноускоренно, если начальная скорость равна 10 м/с, а ускорение 2 м/с².

Второй уровень

9. Автомобиль движется прямолинейно равноускоренно. За 5 с его скорость уменьшилась в 2 раза и стала равной 10 м/с. С каким ускорением движется автомобиль? Через сколько времени он остановится, если будет двигаться с тем же ускорением?
10. Автомобиль едет прямолинейно равноускоренно на север. Как направлено ускорение автомобиля, если его скорость увеличивается? уменьшается?
11. Как направлено ускорение тела, брошенного вертикально вверх, в верхней точке траектории?
12. Два тела падают из одной точки без начальной скорости. Второе тело начало двигаться через 1 с после первого. Как падающие тела движутся друг относительно друга?
13. Составьте задачу по теме «Прямолинейное равноускоренное движение», ответ у которой был бы: «2 м/с²».

§ 4.

ПУТЬ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

1. Движение без начальной скорости
2. Движение с начальной скоростью
3. Вывод формул для пути при прямолинейном равноускоренном движении
4. Средняя скорость при прямолинейном равноускоренном движении
5. Пути, проходимые за последовательные равные промежутки времени

1. ДВИЖЕНИЕ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Изучая прямолинейное равноускоренное движение на примере скатывания шара с наклонной плоскости, Г. Галилей установил, что

при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости зависимость пути l от времени движения t выражается формулой

$$l = \frac{at^2}{2},$$

где a — модуль ускорения тела.

Ниже мы выведем эту формулу, используя свойства графика зависимости модуля скорости от времени.

Обратите внимание:

при равноускоренном движении без начальной скорости путь пропорционален *квадрату* времени движения.

Это схематически иллюстрирует рис. 4.1, где отмечены положения скатывающегося с наклонной плоскости шара через *равные промежутки времени* — равные, скажем, 1 с. Мы видим, что путь, пройденный шаром за 2 с, в 4 раза больше пути, пройденного за 1 с, а путь, пройденный шаром за 3 с, в 9 раз больше пути, пройденного за 1 с.

Чтобы вы заметили отличие равноускоренного движения от равномерного, напомним, что при равномерном движении путь пропорционален времени движения.

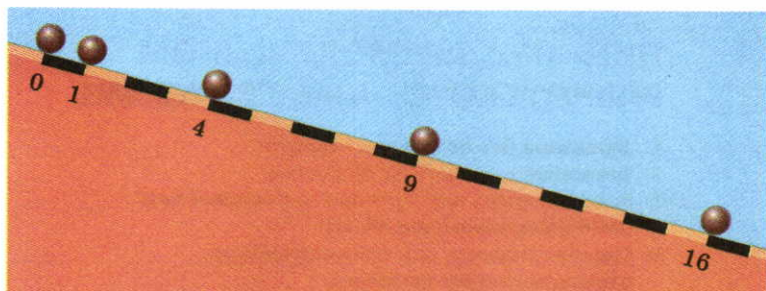


Рис. 4.1. Пройденный шаром путь пропорционален квадрату времени движения

? Два тела начали движение одновременно. Первое тело движется прямолинейно равномерно, а второе — прямолинейно равноускоренно. За первую секунду движения оба тела прошли одинаковый путь. Какое тело пройдет больший путь за 2 с? Во сколько раз больший?

Рассмотрим некоторые примеры.



РЕШИМ ЗАДАЧИ

1. Тело свободно падает из состояния покоя. Какое расстояние оно пролетит за 1 с? за 2 с? за *вторую* секунду падения?

Решение. При свободном падении тело движется с ускорением свободного падения \vec{g} . При падении из состояния покоя $l = \frac{gt^2}{2}$.

Отсюда следует, что за 1 с тело пролетит путь $l_1 = \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (1 \text{ с})^2}{2} = 5 \text{ м}$,

а за 2 с — путь $l_2 = \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (2 \text{ с})^2}{2} = 20 \text{ м}$. Как и следовало ожидать,

путь, пройденный за 2 с, в 4 раза больше, чем путь, пройденный за 1 с.

За *вторую* секунду тело пройдет путь $l_2 - l_1 = 15 \text{ м}$.

Ответ: 5 м; 20 м; 15 м.

2. Разгоняющийся с места автомобиль за 4 с проехал 24 м. Движение автомобиля можно считать равноускоренным. С каким ускорением он двигался?

Дано:

$$t = 4 \text{ с}$$
$$l = 24 \text{ м}$$

$a = ?$

Решение.

Из формулы $l = \frac{at^2}{2}$ следует, что

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

Проверим единицы величин:

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

Подставим числовые значения и получим

$$a = \frac{2 \cdot 24}{4^2} = 3 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right).$$

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

В некоторых задачах требуется найти пройденный телом путь, если время движения неизвестно, но известны ускорение и конечная скорость тела.

Время движения можно выразить через конечную скорость и ускорение:

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

Подставляя это выражение в формулу $l = \frac{at^2}{2}$, получим

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

Из этой формулы следует, в частности, что при свободном падении высота h , с которой падает тело, и его конечная скорость связаны соотношением

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Это соотношение позволяет найти *конечную скорость тела при падении с заданной высоты*

$$v = \sqrt{2gh}.$$

? Тело свободно падает с высоты 80 м. Какова скорость тела у поверхности Земли?

2. ДВИЖЕНИЕ С НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ

Ниже мы покажем, что

если тело движется прямолинейно равноускоренно с начальной скоростью \vec{v}_0 и ускорением \vec{a} , причем направление ускорения совпадает с направлением начальной скорости, то

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

а если ускорение направлено противоположно начальной скорости, то

$$l = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

Обратите внимание: в первом случае скорость тела увеличивается, а во втором — уменьшается.

Если скорость тела уменьшается, то, как мы уже знаем, движение тела до его остановки продолжается в течение промежутка времени, равного $\frac{v_0}{a}$. Поэтому формулой $l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ можно пользоваться только для моментов времени, не превышающих $\frac{v_0}{a}$. Расстояние, пройденное телом до остановки, находим из формулы

$$l = v_0 t - \frac{at^2}{2},$$

подставив в нее вместо t время движения тела до остановки, равное $\frac{v_0}{a}$. После несложных расчетов мы получим, что

если тело движется прямолинейно равноускоренно с *уменьшающейся* скоростью, то до полной остановки оно пройдет путь

$$l = \frac{v_0^2}{2a},$$

где v_0 — модуль начальной скорости, a — модуль ускорения.

Обратите внимание: этот путь (для средств транспорта его называют *тормозным путем*) пропорционален *квадрату* начальной скорости!



РЕШИМ ЗАДАЧУ

При торможении на сухом асфальте автомобиль движется с ускорением, равным по модулю $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Чему равен тормозной путь автомобиля, если он едет со скоростью $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$? Каким будет его тормозной путь при гололеде, когда модуль ускорения $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$?

Дано:

$$v_0 = 72 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$a_1 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$a_2 = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$l_1 - ?$$

$$l_2 - ?$$

Решение.

При движении до остановки автомобиль пройдет путь $l = \frac{v_0^2}{2a}$.

Проверим единицы величин:

$$[l] = \frac{\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \text{м}.$$

Подставим числовые значения и получим:

$$l_1 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 5} = 40 \text{ (м)};$$

$$l_2 = \frac{(20)^2}{2 \cdot 2} = 100 \text{ (м)}.$$

Ответ: 40 м; 100 м.

Обратите внимание: даже на сухом асфальте тормозной путь автомобиля в несколько раз больше длины вашего класса, а во время гололеда тормозной путь еще в 2,5 раза больше!



Тело брошено вертикально вверх со скоростью 20 м/с. На какую высоту оно поднимется?



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ПУТИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Напомним, что пройденный телом путь численно равен площади фигуры под графиком скорости (см. § 3. Прямолинейное равноускоренное движение).

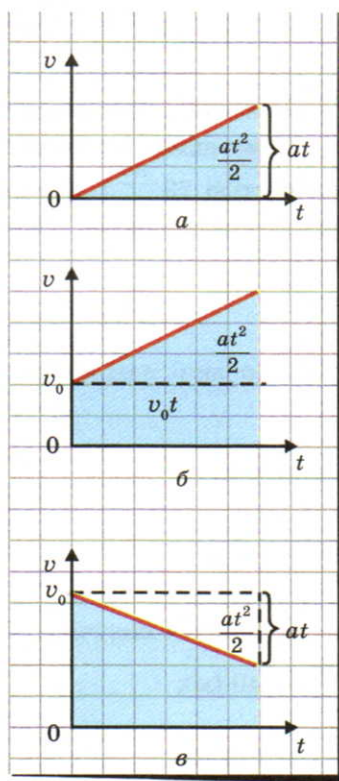


Рис. 4.2. К выводу зависимости пути от времени при равноускоренном движении

В случае прямолинейного равноускоренного движения без начальной скорости $v = at$. Поэтому фигура под графиком скорости — это прямоугольный треугольник с катетами t и at (рис. 4.2, а). Его площадь равна $\frac{at^2}{2}$. Следовательно, путь

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

Если начальная скорость тела равна v_0 и его скорость увеличивается, то $v = v_0 + at$. В этом случае фигура под графиком скорости состоит из прямоугольника площадью $v_0 t$ и прямоугольного треугольника площадью $\frac{at^2}{2}$ (рис. 4.2, б). Следовательно, путь

$$l = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$



Докажите, пользуясь графиком, изображенным на рис. 4.2, в, что при прямолинейном равноускоренном движении с уменьшающейся скоростью путь

$$l = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

4. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Докажем, что

при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости средняя скорость тела равна половине конечной скорости.

При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости путь $l = \frac{at^2}{2}$, а конечная скорость $v = at$.

Поэтому выражение для пути можно написать в виде $l = \frac{vt}{2}$. Вспомним теперь, что при прямолинейном движении в одном

направлении модуль средней скорости $v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$. Подставляя в эту формулу выражение для l , получаем

$$v_{\text{ср}} = \frac{v}{2}.$$

Доказательство завершено.

Предлагаем вам доказать самим, что

при прямолинейном равноускоренном движении, когда конечная скорость равна нулю, средняя скорость тела равна половине его начальной скорости.

Эти свойства средней скорости прямолинейного равноускоренного движения позволяют значительно упростить решение некоторых задач. Рассмотрим пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Автомобиль начал тормозить, когда его скорость была равна $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Сколько времени продолжалось торможение до остановки, если тормозной путь 200 м?

Дано:

$$v = 72 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$l = 200 \text{ м}$$

$$t = ?$$

Решение.

$$\text{Средняя скорость } v_{\text{ср}} = \frac{v}{2};$$

$$t = \frac{l}{v_{\text{ср}}} = \frac{l}{\frac{v}{2}} = \frac{2l}{v}.$$

Проверим единицы величин:

$$[t] = \frac{\frac{\text{м}}{\text{с}}}{\frac{\text{м}}{\text{с}}} = \text{с}.$$

Подставим числовые значения и получим

$$t = \frac{2 \cdot 200}{20} = 20 \text{ (с)}.$$

Ответ: 20 с.

5. ПУТИ, ПРОХОДИМЫЕ ЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ РАВНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ ВРЕМЕНИ

Основные свойства прямолинейного равноускоренного движения установил Г. Галилей. Например, он обнаружил такое замечательное свойство:

при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости пути, проходимые телом за последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечетные числа ($1 : 3 : 5 : 7 \dots$).

Это свойство прямолинейного равноускоренного движения схематически иллюстрирует рис. 4.3.

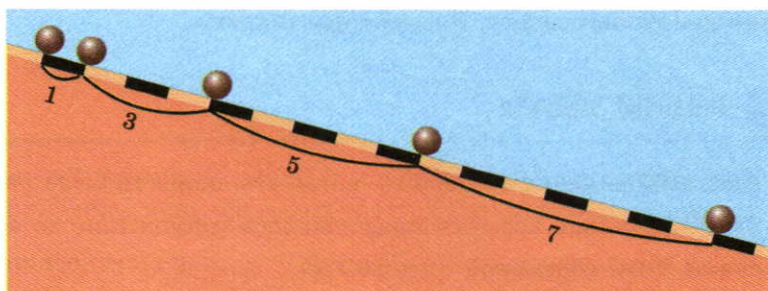


Рис. 4.3. Пути, проходимые шаром за последовательные равные промежутки времени

Докажем это для трех первых последовательных промежутков времени (после этого вы сможете продолжить доказательство сами).

Воспользуемся тем, что путь численно равен площади фигуры под графиком зависимости модуля скорости от времени. На рис. 4.4, а пути, пройденные за каждый из трех первых последовательных равных промежутков времени (для определенности мы взяли по 1 с каждый), численно равны площадям желтой, зеленой и синей фигур. Разобьем все фигуры, кроме первой, на треугольники, площадь каждого из которых равна площади первой фигуры (рис. 4.4, б). Это разбиение наглядно показывает, что пути, проходимые за три первых последовательных равных промежутка времени, относятся как $1 : 3 : 5$.

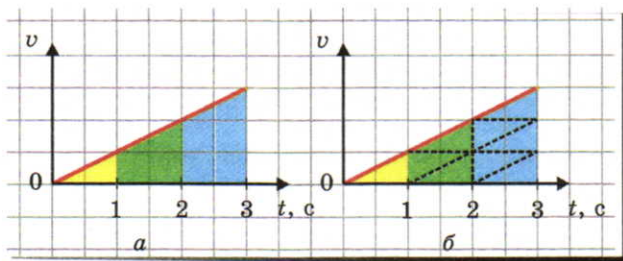


Рис. 4.4. К выводу соотношения для путей, проходимых телом за последовательные равные промежутки времени

? Шарик скатывается по наклонной плоскости длиной 90 см за 3 с. Какое расстояние проходит шарик за каждую секунду?

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости зависимость пути l от времени движения t выражается формулой $l = \frac{at^2}{2}$, где a — модуль ускорения тела. Отсюда следует, что при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости путь пропорционален квадрату времени движения.
- Если тело движется прямолинейно равноускоренно с начальной скоростью \vec{v}_0 и ускорением \vec{a} , причем направление ускорения совпадает с направлением начальной скорости, то $l = v_0 t + \frac{at^2}{2}$, а если ускорение направлено противоположно начальной скорости, то $l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$.
- При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости путь $l = \frac{v^2}{2a}$, где v — модуль конечной скорости, a — модуль ускорения.

- Тормозной путь при заданной начальной скорости: если тело движется прямолинейно равноускоренно с уменьшающейся скоростью, то до полной остановки оно пройдет путь $l = \frac{v_0^2}{2a}$, где v_0 — модуль начальной скорости, a — модуль ускорения.
- При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости средняя скорость тела равна половине конечной скорости. При прямолинейном равноускоренном движении, когда конечная скорость равна нулю, средняя скорость тела равна половине его начальной скорости.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Тело двигалось прямолинейно равноускоренно без начальной скорости. Ускорение тела 5 м/с^2 . Какой путь тело прошло за 1 с? за 2 с? за вторую секунду?
2. При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости тело прошло за первую секунду 3 м. Какой путь пройдет это тело за 2 с? за 3 с?
3. С какой высоты свободно падало тело, если падение продолжалось 2 с?
4. Какова конечная скорость тела при падении с высоты 20 м?
5. Автомобиль тронулся с места и двигался с ускорением 3 м/с^2 . Чему равна скорость автомобиля через 2 с? Какой путь проедет автомобиль за указанное время?
6. Чему равен тормозной путь автомобиля, если его начальная скорость 20 м/с , а модуль ускорения при торможении 2 м/с^2 ?
7. Автомобиль двигался с начальной скоростью 10 м/с . Он начал разгоняться с ускорением 2 м/с^2 . Какой путь он проехал за 3 с?

Второй уровень

8. Докажите, что при прямолинейном равноускоренном движении в одном направлении средняя скорость тела равна полусумме начальной и конечной скорости.

9. Автомобиль движется равноускоренно на участке дороги длиной 1 км. Начальная скорость автомобиля 40 км/ч, а конечная — 80 км/ч. Сколько времени он ехал на этом участке?
10. Санки скатились по склону горы длиной 48 м за 16 с. Какова скорость санок в конце спуска? Движение санок можно считать равноускоренным, начальная скорость санок равна нулю.
11. Автомобиль тормозил в течение 5 с. При этом скорость автомобиля уменьшилась с 30 до 10 м/с. Какой путь проехал автомобиль за время торможения?
12. Докажите, что при равноускоренном движении в одном направлении с уменьшающейся скоростью $l = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$, где обозначения физических величин соответствуют обозначениям в тексте параграфа.
13. Ружейная пуля пробила песчаный вал. При этом скорость пули уменьшилась с 500 до 300 м/с. Движение пули внутри вала можно считать равноускоренным. С каким ускорением двигалась пуля внутри вала, если его толщина 1 м? Сколько времени двигалась пуля внутри вала?
14. Составьте задачу по теме «Путь при прямолинейном равноускоренном движении», ответ у которой был бы: «125 м».

§ 5.

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

1. Модуль и направление скорости при равномерном движении по окружности
2. Период и частота обращения
3. Ускорение при равномерном движении по окружности
- 4. Почему при равномерном движении по окружности ускорение направлено к центру окружности?

1. МОДУЛЬ И НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Как мы уже говорили, движение Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца приближенно можно считать *равномерным движением по окружности*.

Равномерное движение по окружности часто встречается в технике, например, так движутся части вращающихся механизмов.

Напомним, что при равномерном движении тело проходит равные пути за любые равные промежутки времени. При этом

мгновенная скорость тела остается неизменной *по модулю*. Далее мы будем, как обычно, называть мгновенную скорость просто скоростью.

Итак,

при равномерном движении тела по окружности модуль скорости остается неизменным.

А что же изменяется? Изменяется *направление скорости*. Покажем, что

при движении по окружности скорость в любой точке траектории направлена *по касательной* к окружности в этой точке.

Напомним, что *мгновенная* скорость в данный момент — это средняя скорость тела за очень малый промежуток времени, включающий данный момент.

Из формулы $\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\vec{s}}{t}$ следует, что средняя скорость за этот промежуток времени направлена так же, как перемещение \vec{s} .

Пусть за малый промежуток времени t тело, движущееся по окружности, переместилось из точки 1 в точку 2 (рис. 5.1, а). Когда промежуток времени t уменьшается, точки 1 и 2 сближаются. При этом направление перемещения \vec{s} , а вместе с ним и направление скорости приближаются к направлению *касательной* к окружности в этой точке.

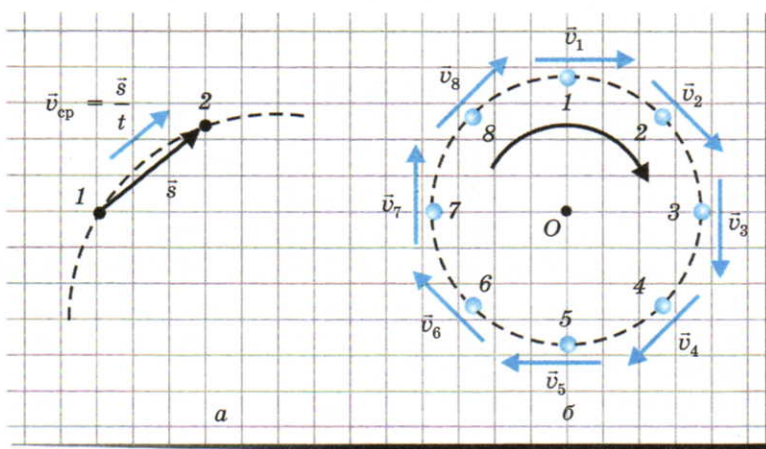


Рис. 5.1. При движении по окружности скорость в каждой точке траектории направлена по касательной к окружности в данной точке

На рис. 5.1, б изображена скорость тела в разных точках траектории при равномерном движении по окружности. Обратите внимание, что на чертежах вектор скорости тела располагают рядом с телом.

2. ПЕРИОД И ЧАСТОТА ОБРАЩЕНИЯ

Промежуток времени, в течение которого тело, равномерно движущееся по окружности, совершает один полный оборот, называют *периодом обращения* и обозначают T .

? Чему равен период обращения часовой стрелки часов? минутной? секундной?

Чему равен период обращения Земли вокруг Солнца?

Найдем, как связаны период обращения T , радиус окружности R и модуль скорости v .

За время одного полного оборота T тело проходит путь $l = 2\pi R$, равный длине окружности.

Поэтому

при равномерном движении по окружности модуль скорости тела v , радиус окружности R и период обращения T связаны соотношением

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

Это соотношение позволяет найти любую из величин v , R и T , если известны две другие.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Какова скорость движения Земли на ее орбите вокруг Солнца? Выразите эту скорость в километрах в секунду. Расстояние от Земли до Солнца можно принять равным 150 млн км.

Решение. Период T обращения Земли при ее движении вокруг Солнца равен 1 году. Выражая период в секундах, получим $T = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \approx 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$. Следовательно,

$$v = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ с}} = 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Ответ: $30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Число полных оборотов за 1 с называют *частотой обращения* и обозначают ν .

Частоту измеряют в $\frac{1}{\text{с}}$. Частота не всегда выражается целым числом. Например, если тело совершает полный оборот за 2 с, то $\nu = 0,5 \frac{1}{\text{с}}$.

Докажем, что

период и частота являются взаимно обратными величинами:

$$T = \frac{1}{\nu}, \text{ а } \nu = \frac{1}{T}.$$

Предположим, что тело совершило n полных оборотов за время t . Тогда период обращения

$$T = \frac{t}{n},$$

а число оборотов в секунду, то есть частота обращения

$$\nu = \frac{n}{t}.$$

Полученные выражения для T и ν являются взаимно обратными. Доказательство завершено.

? Чему равна частота обращения, если период равен 5 с?

Чему равен период обращения, если частота равна $10 \frac{1}{\text{с}}$?

Во сколько раз частота обращения минутной стрелки часов больше частоты обращения часовой стрелки?

3. УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Как мы видели, при равномерном движении по окружности *направление* скорости все время *изменяется*. А любое изменение скорости тела — в том числе и только по направлению — означает, что тело *движется с ускорением*.

Как показано ниже,

при равномерном движении по окружности ускорение тела направлено по радиусу к центру¹ окружности.

¹ Поэтому это ускорение называют *центростремительным*.

Например, при движении по орбитам вокруг Солнца Земля и другие планеты движутся с *ускорением, направленным к Солнцу* (рис. 5.2). И. Ньютон первым догадался, что причиной этого ускорения является притяжение всех планет Солнцем. Мы расскажем об этом в § 10. Закон всемирного тяготения.

В курсе физики старших классов будет показано, что

при равномерном движении по окружности модуль ускорения

$$a = \frac{v^2}{R}, \text{ где } v — \text{модуль скорости тела, } R — \text{радиус окружности, по которой движется тело.}$$

Эту формулу мы используем для расчета скорости, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли (см. § 10. Закон всемирного тяготения).

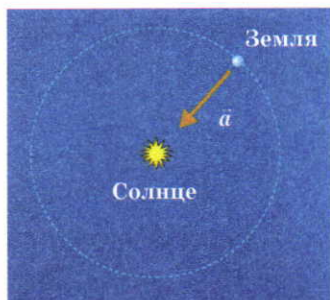


Рис. 5.2. Ускорение Земли при ее движении вокруг Солнца направлено все время к Солнцу



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

4. ПОЧЕМУ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ УСКОРЕНИЕ НАПРАВЛЕНО К ЦЕНТРУ ОКРУЖНОСТИ?

Ускорение \vec{a} тела в данный момент времени¹ определяют формулой

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

где вектор $\Delta \vec{v}$ представляет собой изменение скорости за очень малый промежуток времени Δt (в данном случае малый по сравнению с периодом обращения T).

¹ Его называют мгновенным ускорением — аналогично мгновенной скорости как скорости тела в данный момент времени.

Обозначим \vec{v}_1 и \vec{v}_2 скорость тела в моменты времени 1 и 2, разделенные малым промежутком времени Δt (рис. 5.3, а).

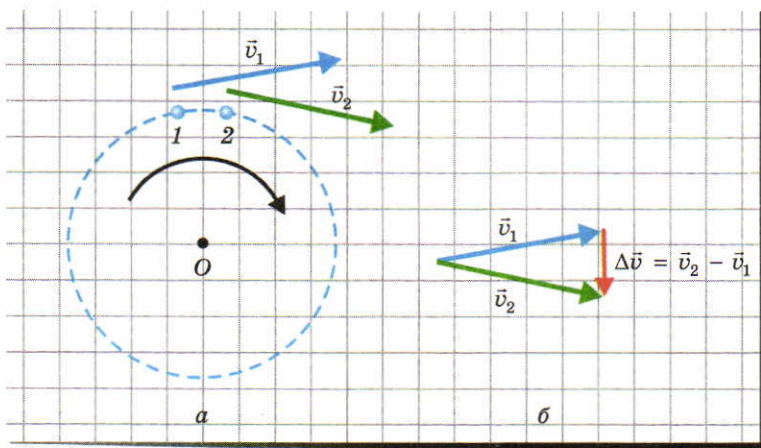


Рис. 5.3. К нахождению направления ускорения тела при его равномерном движении по окружности

Изменение скорости за этот промежуток времени $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. Удобно переписать эту формулу в виде $\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \Delta \vec{v}$, чтобы было видно, что вектор $\Delta \vec{v}$ соединяет конец вектора \vec{v}_1 с концом вектора \vec{v}_2 (рис. 5.3, б).

Поскольку скорости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 равны по модулю, векторы \vec{v}_1 , \vec{v}_2 и $\Delta \vec{v}$ образуют равнобедренный треугольник с основанием $\Delta \vec{v}$. Если промежуток времени Δt очень мал, то очень мал и угол при вершине этого треугольника. Сумма всех углов треугольника 180° , поэтому если угол при вершине равнобедренного треугольника очень мал, то углы при его основании близки к *прямым* углам. Отсюда следует, что когда промежуток времени Δt стремится к нулю, вектор изменения скорости $\Delta \vec{v}$ направлен *перпендикулярно* вектору скорости: по радиусу к центру окружности.

Согласно формуле $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ направление ускорения совпадает с направлением изменения скорости. Значит, мы доказали, что при равномерном движении по окружности *ускорение тела в каждой точке траектории направлено к центру окружности*.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При равномерном движении тела по окружности модуль скорости остается неизменным, а направление скорости изменяется: в любой точке траектории скорость направлена по касательной к окружности в этой точке.
- Промежуток времени, в течение которого тело, равномерно движущееся по окружности, совершает один полный оборот, называют периодом обращения и обозначают T .
- Число полных оборотов за 1 с называют частотой обращения и обозначают ν .
- Период и частота являются взаимно обратными величинами: $T = \frac{1}{\nu}$, а $\nu = \frac{1}{T}$.
- При равномерном движении по окружности модуль скорости тела v , радиус окружности R и период обращения T связаны соотношением $v = \frac{2\pi R}{T}$.
- При равномерном движении по окружности ускорение тела направлено по радиусу к центру окружности.
- При равномерном движении по окружности модуль ускорения $a = \frac{v^2}{R}$, где v — модуль скорости тела, R — радиус окружности, по которой движется тело.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Как направлена скорость тела при движении по окружности?
2. Что такое период и частота обращения? Как они связаны?
3. Период обращения равен 10 с. Чему равна частота?
4. Как связаны период обращения T , скорость тела v и радиус R окружности при равномерном движении тела по окружности?
5. Как направлено ускорение тела при равномерном движении по окружности?

Второй уровень

6. С какой скоростью движутся концы часовой, минутной и секундной стрелок настенных часов? Примите, что длина каждой из этих стрелок 10 см.
7. Оцените, с какой скоростью движется Луна вокруг Земли. Радиус орбиты Луны примите равным 400 тыс. км. Догадайтесь сами, какой промежуток времени надо взять в качестве периода.
8. Во время полярного дня полярник, находящийся на льдине вблизи Северного полюса, совершил «кругосветное путешествие» за одни сутки: он двигался по окружности с центром в Северном полюсе так, что Солнце все время находилось прямо перед ним (рис. 5.4). Каков был радиус этой окружности, если полярник двигался круглосуточно со скоростью 4 км/ч?

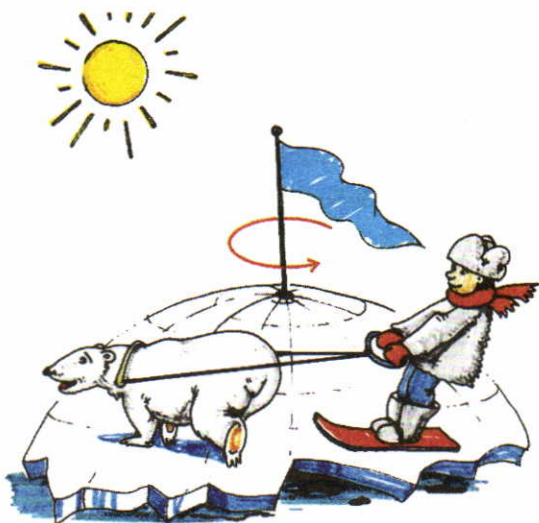


Рис. 5.4. К заданию 8

9. Каков радиус окружности, по которой едет автомобиль, если его ускорение при скорости 72 км/ч равно половине ускорения свободного падения?
10. Составьте задачу по теме «Равномерное движение по окружности», ответ у которой был бы: «3 с».



ГЛАВНОЕ В § 1–5

- Механика изучает движение и взаимодействие тел.
- Механическим движением называют изменение со временем положения тела в пространстве относительно других тел.
- Физическую модель тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, называют материальной точкой.
- Тело отсчета, связанные с ним система координат и часы образуют систему отсчета.
- Линию в пространстве, вдоль которой движется тело, называют траекторией движения тела. Длину траектории движения тела называют путем, пройденным телом.
- Если за любые равные промежутки времени тело проходит равные пути, движение тела называют равномерным.
- Перемещением тела за данный промежуток времени называют направленный отрезок, соединяющий положение тела в начальный момент этого промежутка времени с положением тела в конечный момент этого промежутка времени. Перемещение является вектором.
- В предложенной Коперником гелиоцентрической системе мира все планеты, включая Землю, движутся вокруг Солнца.
- Прямолинейным равномерным движением называют такое движение тела, при котором оно за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.
- Скоростью \vec{v} прямолинейного равномерного движения называют физическую величину, равную отношению перемещения \vec{s} к промежутку времени t , за который произошло это перемещение: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$. Скорость является векторной величиной. В случае прямолинейного равномерного движения $v = \frac{l}{t}$.
- Графиком зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении является отрезок прямой.
- Площадь фигуры под графиком модуля скорости численно равна пути, пройденному телом.

- Неравномерным движением называют такое движение, при котором тело проходит за равные промежутки времени разные пути.
- Средней скоростью неравномерного движения \bar{v}_{cp} за данный промежуток времени t называют физическую величину, равную отношению перемещения \bar{s} к промежутку времени, за который это перемещение произошло: $\bar{v}_{\text{cp}} = \frac{\bar{s}}{t}$.
- Прямолинейное движение, при котором за любые равные промежутки времени скорость тела изменяется на одну и ту же величину, называют прямолинейным равноускоренным движением.
- Ускорением \bar{a} называют векторную величину, равную отношению изменения скорости тела $\bar{v} - \bar{v}_0$ к промежутку времени t , за который это изменение произошло: $\bar{a} = \frac{\bar{v} - \bar{v}_0}{t}$.
- Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, падающее тело движется равноускоренно. Такое падение называют свободным. При свободном падении модуль ускорения тела равен $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, причем для всех тел ускорение одинаково.
- Если направление ускорения тела совпадает с направлением начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = v_0 + at$. Если ускорение тела направлено противоположно начальной скорости тела, то зависимость модуля скорости от времени выражается формулой $v = v_0 - at$.
- При прямолинейном равноускоренном движении графиком зависимости модуля скорости от времени является отрезок прямой.
- Если тело движется прямолинейно равноускоренно с начальной скоростью \bar{v}_0 и ускорением \bar{a} , причем направление ускорения совпадает с направлением начальной скорости, то $l = v_0 t + \frac{at^2}{2}$, а если ускорение направлено противоположно начальной скорости, то $l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$.

- При равномерном движении тела по окружности модуль скорости остается неизменным, а направление скорости изменяется: в любой точке траектории скорость направлена по касательной к окружности в этой точке.
- Промежуток времени, в течение которого тело, равномерно движущееся по окружности, совершает один полный оборот, называют периодом обращения и обозначают T . Число полных оборотов за одну секунду называют частотой обращения и обозначают ν . Период и частота являются взаимно обратными величинами: $T = \frac{1}{\nu}$, а $\nu = \frac{1}{T}$.
- При равномерном движении по окружности модуль скорости тела v , радиус окружности R и период обращения T связаны соотношением $v = \frac{2\pi R}{T}$.
- При равномерном движении по окружности ускорение тела направлено по радиусу к центру окружности. Модуль ускорения $a = \frac{v^2}{R}$, где v — модуль скорости тела, R — радиус окружности, по которой движется тело.

§ 6.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ — ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Когда скорость тела изменяется?
2. Закон инерции
3. Инерциальные системы отсчета и первый закон Ньютона
4. Применение явления инерции
- 5. Очевиден ли первый закон Ньютона?

1. КОГДА СКОРОСТЬ ТЕЛА ИЗМЕНЯЕТСЯ?



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Ударьте лежащую на льду шайбу, и она начнет двигаться (рис. 6.1). Значит, действие клюшки на шайбу *изменило скорость* шайбы.

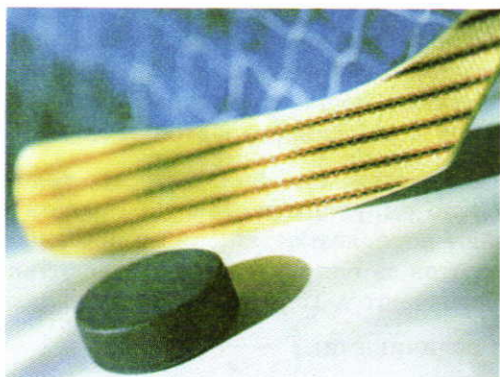


Рис. 6.1. Скорость шайбы при ударе изменяется

А если ударить по движущейся шайбе? И в этом случае ее *скорость изменится*: ударом можно остановить шайбу или придать ей скорость в другом направлении.

Этот и другие подобные опыты и наблюдения, с которыми знаком каждый из нас, показывают, что *в результате действия на тело других тел его скорость изменяется*.

Но *всегда* ли это так? Может ли скорость тела *изменяться*, хотя на него *не действуют* другие тела?



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Проследим за движением шайбы по льду после удара клюшкой. Мы заметим, что скорость шайбы *уменьшается*. Это уменьшение скорости при движении шайбы будет намного заметнее, если она будет скользить не по льду, а по асфальту.

Какое же тело действует на скользящую шайбу, уменьшая ее скорость? Мы ведь не видим, что ее что-то тянет или толкает. Может, шайба тормозится сама собой? Но если это торможение — свойство самой шайбы, то почему на асфальте она тормозится намного сильнее, чем на льду?

Вы, конечно, догадались: причиной уменьшения скорости шайбы является *трение*. При скольжении шайбы по асфальту трение намного больше, чем при скольжении по льду, вот почему после одного и того же удара шайба при движении по ас-

фальту останавливается намного раньше, чем при движении по льду.

Первым, кто понял, что скорость тела уменьшается вследствие трения, был Г. Галилей.

А вот другой пример действия тела-«невидимки».



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Поднимите мяч и отпустите его. Он начнет падать. При падении, как мы уже знаем, скорость тела *увеличивается*.

Какое же тело действует на падающий мяч, ускоряя его? Разве мы видим, что его при падении что-то тянет или толкает?

Этим «невидимым» действующим на мяч телом является огромная Земля. Как ни странно, долгое время ее не замечали именно из-за ее огромности (вспомним поговорку «Все великое видится издалека»). Земля *притягивает* мяч.

Первым, кто понял, что ускорение падающих тел обусловлено притяжением Земли, был И. Ньютон. Об этом мы подробнее расскажем в § 10. *Закон всемирного тяготения*.

Но вследствие притяжения Земли скорость тела не обязательно увеличивается!



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Бросьте мяч вертикально вверх. Во время подъема мяча его скорость *уменьшается*.

Это уменьшение скорости также обусловлено притяжением мяча Землей.

Итак, на основании наших опытов и наблюдений мы можем предположить, что

скорость тела изменяется только вследствие действия на него других тел.

2. ЗАКОН ИНЕРЦИИ

То, что скорость тела изменяется *только* вследствие действия на это тело других тел, первым предположил Г. Галилей.

Галилей был первым из ученых, кто начал проверять свои предположения *на опыте*. Он скатывал шары с наклонной плоскости (с одной и той же высоты) и наблюдал за их дальнейшим движением по *горизонтальной* поверхности. Ученый заметил: чем более твердая и гладкая эта поверхность, тем *дольше* катится по ней шар.

Так, по посыпанной песком поверхности шар прокатится совсем немного (рис. 6.2, а), по ткани прокатится намного дольше (рис. 6.2, б), а по гладкому стеклу будет катиться очень долго (рис. 6.2, в). Но в конце концов все-таки остановится.

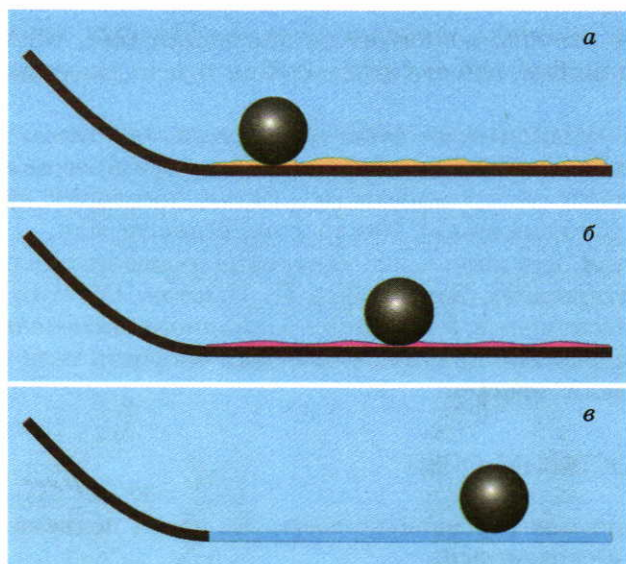


Рис. 6.2. Чем меньше трение, тем дольше катится шар

На основании своих опытов Галилей догадался, что причиной уменьшения скорости шара является *трение*. При движении шара по ткани трение меньше, чем при движении по песку, а при движении по стеклу — еще меньше. Но все-таки и в этом случае трение есть. Может, только поэтому шар и останавливается в конце концов?

И Галилей высказал гениальную догадку: он предположил, что если бы трения не было *совсем*, шар катился бы с неизменной скоростью *вечно*! Так был открыт первый закон механики. Его формулируют как

закон инерции: если на тело не действуют другие тела, то оно движется прямолинейно равномерно или сохраняет состояние покоя.

Тело движется с постоянной (по модулю и направлению) скоростью и в том случае, когда действия других тел, действующих на данное тело, *скомпенсированы*. Примерно так и происходит в случае шара, катящегося по стеклу: трение при этом очень мало, а притяжение шара Землей компенсируется тем, что стекло давит на шар снизу вверх.

То, что тело *сохраняет* свою скорость, если на него не действуют другие тела (или действия этих тел скомпенсированы), называют *явлением инерции*. О разнообразных применениях этого явления мы расскажем ниже.

3. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Начатое Г. Галилеем в 16-м веке открытие законов механики завершил в 17-м веке И. Ньютон. Он сформулировал систему основных законов механики, которые впоследствии называли «тремя законами Ньютона».



В качестве *первого* из этих законов Ньютон взял открытый Галилеем закон инерции¹. Поэтому закон инерции называют также *первым законом Ньютона*.

¹ Ньютон признавал за Галилеем честь открытия этого закона: он говорил о себе, что «стоял на плечах гигантов», одним из которых был Галилей.

Современную формулировку первого закона Ньютона мы приведем чуть ниже. В ней учитывается, что *закон инерции выполняется не во всех системах отсчета*.

Например, опыт показывает, что он с хорошей точностью выполняется в системе отсчета, связанной с Землей. А вот, например, в системе отсчета, связанной с едущим по городской улице автобусом, закон инерции не выполняется: когда автобус трогается с места, пассажиров «бросает» назад, а когда автобус тормозит, пассажиров «бросает» вперед.

Системы отсчета, в которых выполняется закон инерции, называют *инерциальными*.

То, что закон инерции с хорошей точностью выполняется в системе отсчета, связанной с Землей, означает, что

связанную с Землей систему отсчета с хорошей точностью можно считать инерциальной системой отсчета.

В приведенной ниже формулировке первого закона Ньютона указано, в каких системах отсчета он справедлив.

Первый закон Ньютона: существуют системы отсчета, называемые инерциальными, в которых тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, если на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНЕРЦИИ

Явление инерции мы используем очень часто. Например, его применяет каждый, кто бросает мяч или разбегается для прыжка. И в том, и в другом случае используют то, что тело сохраняет скорость и движется само по себе.

Использует явление инерции и велосипедист, который, разогнавшись на ровном шоссе, наслаждается какое-то время быстрым движением, не крутя педали.

Особенно эффектно используют явление инерции в зимних видах спорта, где трение удается сделать особенно малым (рис. 6.3).

? Почему при встряхивании мокрого зонта с него слетают капли воды?

Однако явление инерции может быть и опасным, если его не учитывать. Например, когда вы быстро едете на велосипеде, нельзя резко тормозить передним тормозом: «сохраняя скорость», вы можете вылететь из седла и перелететь через руль!



Рис. 6.3. Когда трение мало, тела могут долгое время двигаться сами по себе



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

5. ОЧЕВИДЕН ЛИ ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Закон инерции (первый закон Ньютона) кажется очень простым. Но почему же тогда его не открыл древнегреческий ученый Аристотель, который начал изучать движение тел за две тысячи лет до Галилея?

Аристотель утверждал: чтобы тело двигалось, его необходимо «двигать». И наблюдения действительно указывают на то, что тела «сами по себе» не движутся. Например, когда лошадь перестает тянуть повозку, повозка останавливается; когда стихает ветер, листья на деревьях замирают. Поэтому в справедливости учения Аристотеля не сомневались две тысячи лет.

Галилей сделал принципиально новый шаг в изучении движения: он перешел от наблюдений к *опытам*. В этих опытах он установил, что движение прекращается из-за вполне определенной причины — *из-за трения*. И догадался, что если бы трение можно было устранить совсем, то тело двигалось бы «само по себе» вечно! Это и было открытием закона инерции.

Однако открытие закона инерции вовсе не сделало его очевидным: ему и сегодня «противится» здравый смысл. И причина та же, что мешала Аристотелю открыть этот закон: мы видим, что окружающие нас тела не движутся сами по себе сколь угодно долго! Как же не верить собственным глазам?

Но дело в том, что любое движение в окружающем нас «земном» мире сопровождается трением — мы его так же не замечаем, как не замечал его когда-то и Аристотель.

Однако мы уже знаем, что вследствие трения движение не исчезает, а переходит из одной формы в другую: тела нагреваются, т. е. увеличивается скорость хаотического движения частиц, из которых состоят эти тела.

Сегодня, когда люди научились значительно уменьшать трение, способность тел сохранять движение перестала казаться такой удивительной.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Скорость тела изменяется только вследствие действия на него других тел.
- Закон инерции: если на тело не действуют другие тела, то оно движется прямолинейно равномерно или сохраняет состояние покоя.
- Системы отсчета, в которых выполняется закон инерции, называют инерциальными. Систему отсчета, связанную с Землей, с хорошей точностью можно считать инерциальной системой отсчета.
- Первый закон Ньютона: существуют системы отсчета, называемые инерциальными, в которых тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, если на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Когда скорость тела изменяется?
2. Может ли скорость тела измениться, если на него не действуют другие тела?

3. Может ли скорость тела оставаться неизменной, хотя на него действуют другие тела? Подтвердите свой ответ примером.
4. Сформулируйте закон инерции. Кто его открыл?
5. В чем состоит явление инерции? Приведите примеры этого явления.
6. Какие системы отсчета называют инерциальными?
7. Можно ли связанную с Землей систему отсчета приближенно считать инерциальной?
8. Сформулируйте первый закон Ньютона.
9. Приведите примеры проявления и применения первого закона Ньютона.
10. Почему опасно резко тормозить передним тормозом, когда вы быстро едете на велосипеде?

§ 7.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СИЛЫ

1. Силы в механике
2. Чем характеризуется каждая сила?
3. Примеры действия сил
4. Измерение сил
5. Сложение сил

1. СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

Действия тел друг на друга описывают с помощью *сил*. Каждая сила характеризуется числовым значением и направлением, то есть является *векторной* величиной. Итак,

сила — векторная величина, являющаяся мерой действия одного тела на другое.

Как показывает опыт,

все механические явления можно объяснить действием трех видов сил: *сил упругости*, *сил тяготения* и *сил трения*.

Со всеми этими силами мы уже познакомились кратко в предыдущем параграфе. Напомним о них.

1) При ударе клюшкой на шайбу со стороны клюшки действовала сила упругости.

Сила упругости возникает при деформации тела, то есть изменении его формы или размеров.

И действительно, можно было заметить, что при ударе клюшка немного изогнулась. Причиной силы упругости является взаимодействие между частицами тела.

2) При скольжении шайбы по льду на нее действовала сила трения со стороны льда.

Силы трения скольжения действуют между соприкасающимися телами, движущимися друг относительно друга.

Силы трения скольжения обусловлены зацеплением неровностей на поверхностях соприкасающихся тел.

3) На падающее тело действует сила притяжения со стороны Земли.

Силу, с которой Земля притягивает тело, называют силой тяжести. Сила тяжести является частным случаем сил всемирного тяготения.

На следующем примере мы увидим, что сила тяжести действует не только на падающие тела.

МОГУТ ЛИ СИЛЫ УРАВНОВЕШИВАТЬ ДРУГ ДРУГА?

Как мы видели на предыдущих примерах, если скорость тела изменяется, значит, на него действует сила.

А верно ли обратное? Можно ли утверждать, что если скорость тела не изменяется (например, книга лежит на столе), то на него не действуют никакие силы?

Нет, нельзя! Например, когда книга лежит на столе, то на нее действуют сила тяжести и сила упругости со стороны стола. А покоится книга потому, что сила тяжести и сила упругости *уравновешивают* друг друга. Итак,

силы могут уравновешивать друг друга.

2. ЧЕМ ХАРАКТЕРИЗУЕТСЯ КАЖДАЯ СИЛА?

На предыдущих примерах мы видели, что

любая сила приложена к *одному* телу со стороны *другого* тела.

Это значит, что в рассказе о любой силе должно быть *два* «действующих лица»: тело, к *которому* приложена эта сила, и тело, *со стороны которого* приложена эта сила.

? Стоя на полу, человек давит на пол с некоторой силой. К какому телу приложена эта сила давления? Со стороны какого тела приложена эта сила?

Действуют ли на вас сейчас какие-то силы? Какие это силы? Со стороны каких тел они приложены?

Кроме того,

каждая сила характеризуется: числовым значением (модулем); направлением; точкой приложения.

На чертежах силу, как и другие векторные величины, обозначают стрелкой. Начало стрелки совпадает с точкой приложения силы, направление стрелки указывает направление силы, а длина стрелки пропорциональна модулю силы. В следующем разделе мы рассмотрим несколько примеров.

Единицу силы в честь Ньютона называют *ньютон* (Н). С определением этой единицы силы мы познакомимся немного позже (см. § 8. *Второй закон Ньютона*), а сейчас отметим только, что 1 Н — сравнительно небольшая сила. Так, когда вы держите на ладони литровый пакет молока или сока, этот пакет давит на ладонь силой, равной примерно 10 Н.

? Можете ли вы приложить силу, равную 100 Н?

3. ПРИМЕРЫ ДЕЙСТВИЯ СИЛ

На рис. 7.1 изображены силы упругости, с которыми действуют друг на друга стол и лежащая на нем книга.

Силу, с которой книга давит на стол, называют *весом* книги.

Весом тела называют силу, с которой тело вследствие притяжения его Землей давит на опору или растягивает подвес.

Вес обычно обозначают \vec{P} . Интересно, что

вес покоящегося тела равен действующей на это тело силе тяжести.

Мы докажем это в § 9. *Третий закон Ньютона*.

Однако вес и сила тяжести — это *разные* силы: вес тела действует на опору (или подвес) со стороны тела, а сила тяжести действует на само тело со стороны Земли.

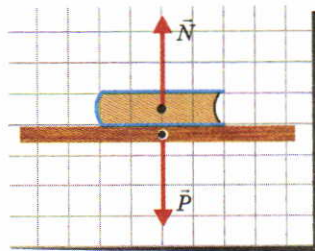


Рис. 7.1. Силы, с которыми книга и стол действуют друг на друга

Силу же, с которой стол давит на книгу снизу вверх, называют *силой нормальной реакции* и обозначают \vec{N} . Такое название обусловлено тем, что эта сила направлена перпендикулярно к поверхности, а перпендикуляр называют иногда *нормалью*.

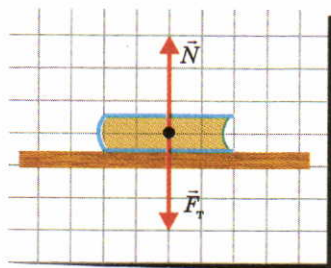


Рис. 7.2. Силы, действующие на лежащую на столе книгу

Если тело можно считать материальной точкой, то точки приложения всех сил, приложенных к одному телу, на чертеже можно помещать в одной точке. Например, на рис. 7.2 изображены силы, действующие на лежащую на столе книгу. Это сила тяжести \vec{F}_t , действующая со стороны Земли, и сила нормальной реакции \vec{N} . Книга находится в покое, потому что эти силы уравнивают¹ друг друга.

Две силы уравнивают друг друга, когда они равны по модулю и направлены противоположно.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ

Вы уже знаете, что сила упругости обусловлена деформацией тела. При этом чем больше деформация, тем больше сила упругости. Значит,

по деформации тела можно судить о значении силы упругости.

Для измерения сил на практике используют свойство силы упругости, открытое в 17-м веке английским физиком Р. Гуком.

¹ Если силы, действующие на тело, уравнивают друг друга, говорят также, что действия этих сил скомпенсированы.

Закон Гука. Подвешивая к пружине различное число одинаковых грузов (рис. 7.3), Гук установил на опыте, что

модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$ прямо пропорционален удлинению пружины x . Соотношение между модулем¹ силы упругости и модулем удлинения пружины можно записать в виде

$$F_{\text{упр}} = k|x|.$$

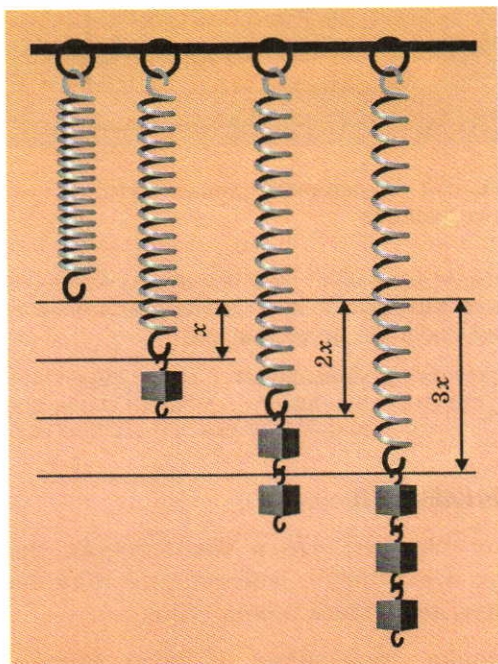


Рис. 7.3. Опыт, иллюстрирующий закон Гука

Коэффициент пропорциональности k называют *жесткостью пружины*. Как видно из приведенной формулы, единицей жесткости является $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

¹ Закон Гука иногда записывают в виде $F_{\text{упр}} = -kx$. При этом имеют в виду проекцию силы упругости на ось x . Проекции векторных величин будут рассмотрены в старших классах.

Прибор для измерения силы, в котором мерой действия силы является деформация пружины, называют пружинным динамометром (рис. 7.4). При градуировке динамометра (построении его шкалы) обычно используют закон Гука.

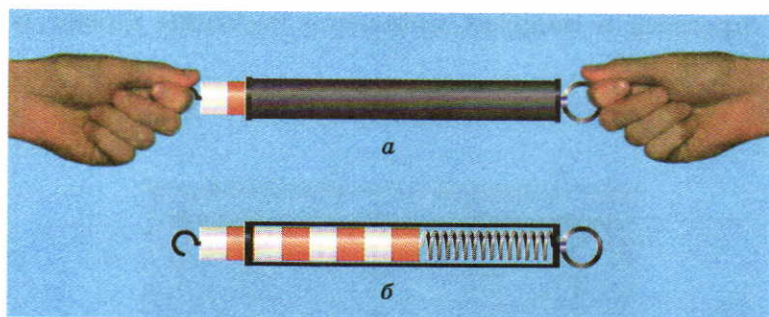


Рис. 7.4. Школьный пружинный динамометр: а — внешний вид; б — внутреннее устройство

? При одинаковом удлинении двух пружин со стороны первой пружины действует сила упругости 2 Н, а со стороны второй — 6 Н. Жесткость какой пружины больше? Во сколько раз?

Удлинение первой пружины равно 2 см, а удлинение второй — 6 см. При этом со стороны этих пружин действуют одинаковые силы упругости. Жесткость какой пружины больше? Во сколько раз?

5. СЛОЖЕНИЕ СИЛ

Опыты показывают, что в тех случаях, когда размерами тела можно пренебречь, действие на тело нескольких сил можно заменить действием *одной* силы.

Силу, которая производит на тело такое же действие, как несколько одновременно приложенных к этому телу сил, называют *равнодействующей* этих сил. Нахождение равнодействующей нескольких сил называют *сложением* этих сил.

Так как силы являются векторными величинами, то силы складывают по правилу сложения векторов.

Если две силы направлены *одинаково*, их равнодействующая направлена так же, а модуль равнодействующей равен сумме модулей сил-слагаемых. На рис. 7.5, а приведен пример сло-

жения таких сил. Силы-слагаемые обозначены синей и зеленой стрелками, а их равнодействующая — красной стрелкой.

Если две не равные по модулю силы направлены *противоположно*, их равнодействующая направлена в сторону большей силы, а модуль равнодействующей равен разности модулей сил-слагаемых. На рис. 7.5, б приведен пример сложения таких сил.

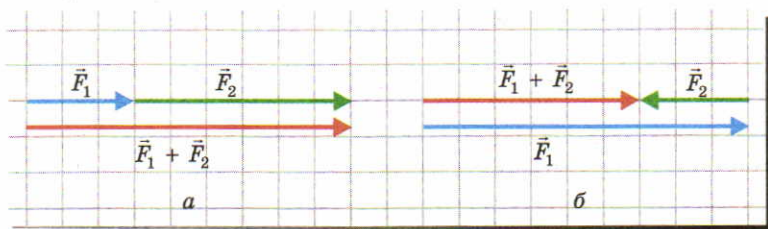


Рис. 7.5. Сложение сил, направленных вдоль одной прямой. Равнодействующая обозначена красной стрелкой

Если силы направлены *под углом друг к другу*, то их равнодействующую находят, используя сложение векторов по правилу параллелограмма, показанному на рис. 7.6. В этом случае начала двух векторов-слагаемых совмещают и строят параллелограмм, смежными сторонами которого являются векторы-слагаемые. Суммой этих векторов является вектор, совпадающий с диагональю построенного параллелограмма, причем начало этого вектора совпадает с общим началом векторов-слагаемых.

На рис. 7.6, а приведен пример сложения сил, когда угол между силами-слагаемыми острый, а на рис. 7.6, б — когда этот угол тупой.

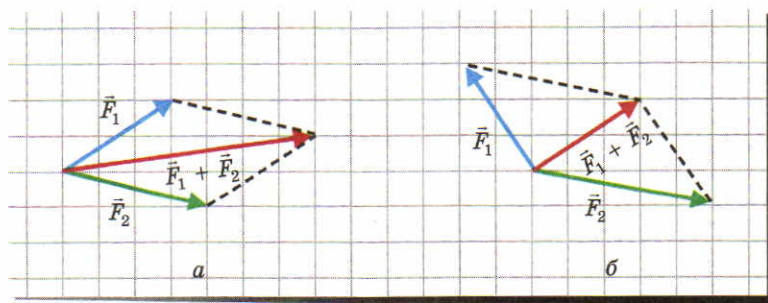


Рис. 7.6. Сложение сил, направленных под углом. Равнодействующая обозначена красной стрелкой

Как мы уже знаем,

если равнодействующая двух сил равна нулю, то эти силы равны по модулю и направлены противоположно.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Сила — векторная величина, являющаяся мерой действия одного тела на другое.
- Все механические явления можно объяснить действием трех видов сил: сил упругости, сил тяготения и сил трения.
- Сила упругости возникает при деформации тела, то есть изменении его формы или размеров.
- Силы трения скольжения действуют между соприкасающимися телами, движущимися друг относительно друга.
- Силу, с которой Земля притягивает тело, называют силой тяжести. Сила тяжести является частным случаем сил всемирного тяготения.
- Любая сила приложена к одному телу со стороны другого тела. Каждая сила характеризуется: 1) числовым значением (модулем); 2) направлением; 3) точкой приложения.
- Весом тела называют силу, с которой тело вследствие притяжения его Землей давит на опору или растягивает подвес. Вес покоящегося тела равен действующей на это тело силе тяжести.
- Силу, с которой опора давит на тело, называют силой нормальной реакции. Она направлена перпендикулярно поверхности опоры.
- Две силы уравнивают друг друга, когда они равны по модулю и направлены противоположно.
- Закон Гука: модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$ прямо пропорционален удлинению пружины x . Закон Гука можно записать в виде $F_{\text{упр}} = k|x|$.
- Силу, которая производит на тело такое же действие, как несколько одновременно приложенных к этому телу сил, называют равнодействующей этих сил.
- Нахождение равнодействующей нескольких сил называют сложением этих сил. Силы складывают по правилу сложения векторов.



Первый уровень

1. Действием каких трех видов сил можно объяснить все механические явления?
2. Приведите пример действия силы упругости.
3. Приведите пример действия силы трения скольжения.
4. Приведите пример действия силы тяжести.
5. Какую силу называют силой тяжести?
6. Что можно сказать о модулях и направлениях двух сил, которые уравновешивают друг друга?
7. Чем характеризуется каждая сила?
8. Приведите пример сил, с которыми два тела действуют друг на друга.
9. Что такое вес тела? Как он связан с силой тяжести?
10. Что такое сила нормальной реакции?
11. Сформулируйте закон Гука.
12. При растяжении пружины на 5 см возникает сила упругости 10 Н. Чему равна жесткость этой пружины?
13. Что называют равнодействующей нескольких сил?
14. Две силы направлены одинаково. Первая сила равна 5 Н, а равнодействующая двух сил 7 Н. Чему равен модуль второй силы?

Второй уровень

15. Одинаково ли направление силы тяжести для всех жителей Москвы? для всех жителей России?
16. Что общего у веса и силы тяжести и чем они различаются?
17. При растяжении первой пружины на 10 см возникает сила упругости 100 Н, а при растяжении второй пружины на 5 см возникает сила упругости 20 Н. Жесткость какой пружины больше и во сколько раз?
18. Когда длина пружины 14 см, сила упругости равна 20 Н, а когда длина пружины 18 см, сила упругости равна 60 Н. Какова длина недеформированной пружины? Чему равна жесткость пружины?
19. Две силы, равные 1 и 2 Н, направлены вдоль одной прямой. Каким может быть модуль равнодействующей этих сил?
20. Две силы направлены перпендикулярно друг другу. Модуль первой силы 3 Н, а модуль второй силы — 4 Н. Чему равен модуль равнодействующей этих сил?
21. Составьте задачу по теме «Взаимодействия и силы», ответ у которой был бы: «Направлены противоположно».

§ 8.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Соотношение между силой и ускорением
2. Масса
3. Второй закон Ньютона
4. Движение тела под действием силы тяжести
- 5. Очевиден ли второй закон Ньютона?

1. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СИЛОЙ И УСКОРЕНИЕМ



ПОСТАВИМ ОПЫТЫ

Изучим на опыте, как движется тело, если на него действует только *одна постоянная сила*, а действия других сил скомпенсированы. Для наших опытов воспользуемся тележкой, которая может катиться по столу практически без трения¹.

Выясним, как движется тележка под действием приложенной к ней горизонтальной силы. Для измерения этой силы удобно укрепить динамометр на самой тележке (рис. 8.1). Соединим нитью тележку и груз, а затем перебросим нить через блок.

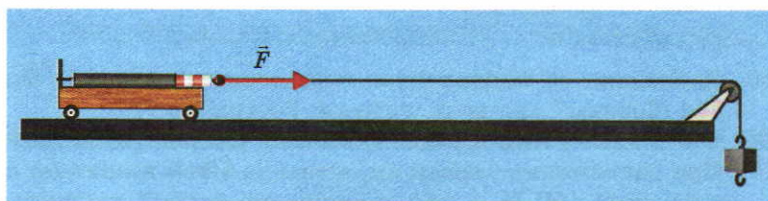


Рис. 8.1. Схема опыта по исследованию соотношения между действующей на тело силой и ускорением тела

Тележка начнет катиться по столу, и ее скорость будет увеличиваться. По показаниям динамометра можно заключить, что на тележку во время движения действует *постоянная сила*.

Измеряя пути, проходимые тележкой за различные промежутки времени, можно заметить, что путь пропорционален

¹ Для демонстрации подобных опытов разработан специальный прибор, в котором тележка движется на «воздушной подушке» — в этом случае трение особенно мало.

квадрату времени движения (рис. 8.2). А это означает, что тележка движется *равноускоренно* (см. § 4. *Путь при прямолинейном равноускоренном движении*).

Итак, этот и другие подобные опыты показывают, что под действием постоянной силы тело движется с постоянным ускорением.

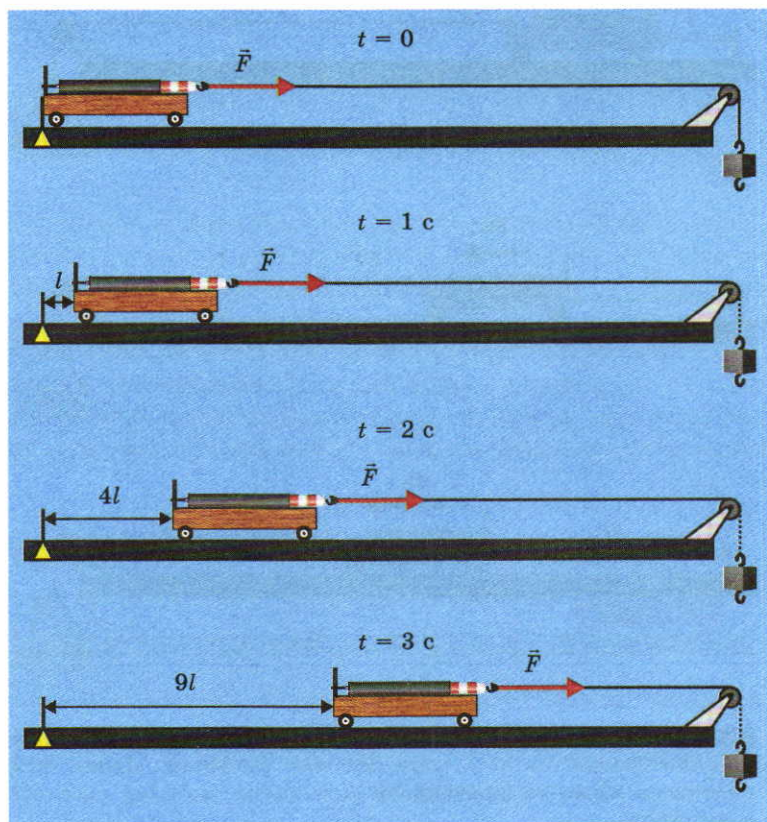


Рис. 8.2. Схема опыта, показывающего, что под действием постоянной силы тело движется равноускоренно. На всех рисунках, кроме первого, груз находится ниже изображенного положения, поэтому нить обозначена пунктиром

Выясним теперь, как связаны модуль ускорения тела и модуль действующей на тело силы.

Изменять действующую на тележку силу можно, подвешивая к нити разные грузы. Измеряют модуль этой силы по показаниям динамометра.

Из формулы $l = \frac{at^2}{2}$ следует, что путь, пройденный тележкой за один и тот же промежуток времени, пропорционален ускорению тележки.

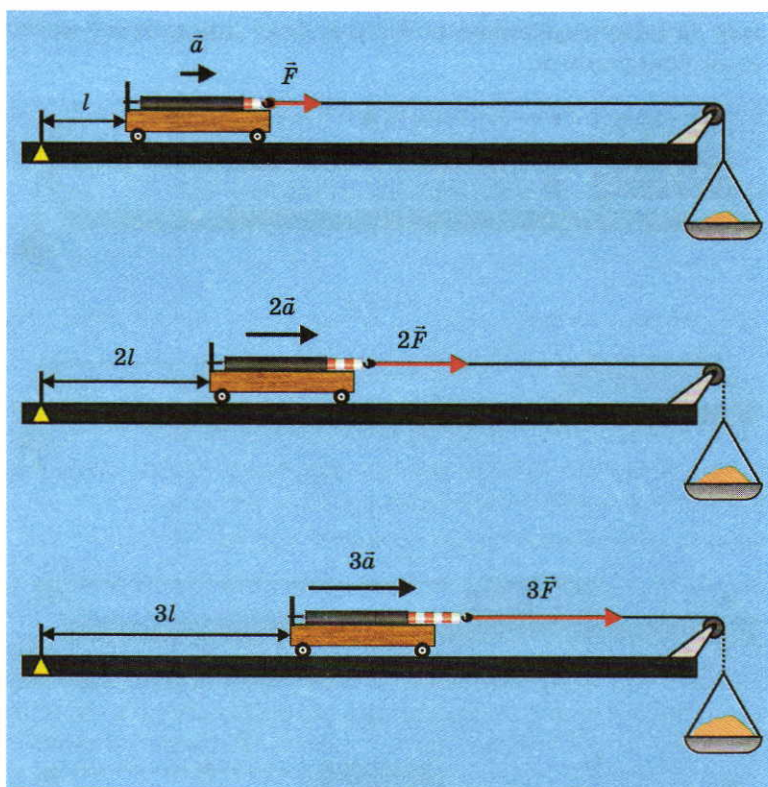


Рис. 8.3. Схема опыта, показывающего, что ускорение тела пропорционально действующей на тело силе. На всех рисунках, кроме первого, груз находится ниже изображенного положения, поэтому нить обозначена пунктиром

Измерения показывают, что этот путь пропорционален действующей на тележку силе (рис. 8.3). А это означает, что

модуль ускорения тела пропорционален модулю действующей на это тело силы.

Наши опыты показывают также, что

направление ускорения тела совпадает с направлением действующей на тело силы.

2. МАССА

Повторив описанные опыты с *двумя* одинаковыми тележками, соединенными так, как показано на рис. 8.4, мы увидим: чтобы сообщить *двум* тележкам такое же ускорение, что и одной, к ним надо приложить в 2 раза большую силу.

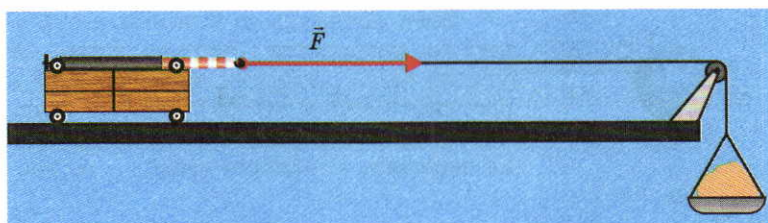


Рис. 8.4. Чтобы сообщить двум тележкам такое же ускорение, что и одной, надо приложить вдвое большую силу

Это означает, что *инертность* двух тележек в 2 раза больше, чем инертность одной тележки. Чем больше инертность тела, тем большую силу надо приложить к этому телу, чтобы сообщить ему данное ускорение.

Мерой инертности тела является *масса*.

Чтобы сообщить телу данное ускорение, к телу надо приложить силу, пропорциональную его массе.

Единицей массы в СИ является килограмм (кг). Это масса эталона (образца), которым служит цилиндр, сделанный из специального сплава и хранящийся в Международном бюро мер и весов во Франции. Приблизительно можно считать, что 1 кг равен массе 1 л пресной воды¹.

Используют также дольные и кратные единицы массы: 1 грамм (г), равный 0,001 кг, а также 1 тонну (т), равную 1000 кг.

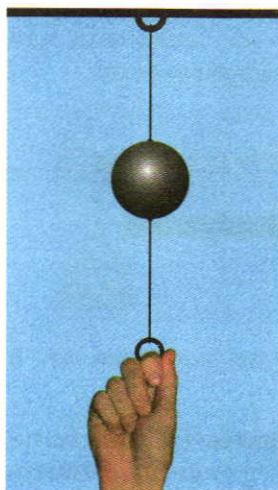
Обратите внимание: *инертность* — это *свойство* тела! Не будем путать его с уже знакомым нам *явлением инерции*, которое состоит в том, что тело сохраняет свою скорость неизменной, если на него не действуют другие тела (или действия других тел скомпенсированы).

Инертностью обладают все тела, но особенно наглядно свойство инертности проявляется у массивных тел. Покажем это на следующем эффектном опыте.

¹ Потому и была выбрана такая единица массы: ее легко воспроизвести с точностью, достаточной для многих случаев.



ПОСТАВИМ ОПЫТ



Подвесим массивный шар на нити, а снизу к шару прикрепим такую же нить (рис. 8.5).

Если потянуть за нижнюю нить *плавно*, то разорвется *верхняя* нить. Этого можно было ожидать: ведь верхняя нить растянута еще и весом шара. Но если *резко дернуть* нижнюю нить, то разорвется не верхняя, а *нижняя* нить!

Рис. 8.5. Опыт по демонстрации свойства инертности

Дело в том, что при резком рывке *массивный* шар из-за свойства инертности не успеет сдвинуться настолько, чтобы заметно растянуть верхнюю нить.

А вот другой похожий опыт. На двух нитях подвешивают деревянную палочку (можно взять карандаш). Если *плавно* надавить рукой на палочку, то одна из нитей разорвется. Но если *резко ударить* по середине палочки металлическим стержнем, то палочка сломается, а обе нити *останутся целы*! Дело в том, что за короткое время удара обладающая инертностью палочка не успевает сместиться настолько, чтобы заметно растянуть нити.

КАК СРАВНИТЬ МАССЫ ДВУХ ТЕЛ?

Опыты показывают, что при взаимодействии двух тел тело с большей массой приобретает меньшее ускорение. Поэтому массы m_1 и m_2 двух тел можно *сравнивать*, сравнивая ускорения этих тел.

Отношение масс двух тел обратно отношению ускорений этих тел при их взаимодействии:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}.$$

Если массы двух тел при их взаимодействии можно сравнивать, то массу любого тела можно и *измерить*, сравнив его с эталоном (или его копией) массой 1 кг. На практике, однако, массу тела измеряют намного проще — с помощью *взвешивания*. Об этом мы расскажем ниже.

3. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Описанные опыты показывают, что сила равна произведению массы тела на ускорение, сообщаемое этой силой. Если на тело действует несколько сил, то ускорение телу сообщает *равнодействующая* этих сил. Обозначим эту равнодействующую \vec{F} .

Соотношение между равнодействующей приложенных к телу сил, массой тела и его ускорением формулируют как

второй закон Ньютона: равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение:

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

Второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчета, потому что только в этих системах отсчета ускорение тела обусловлено действующими на него силами.

Используя второй закон Ньютона, можно найти ускорение \vec{a} тела, если известны масса m тела и равнодействующая \vec{F} всех сил, действующих на это тело. Для этого второй закон Ньютона записывают в виде

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

Такая запись означает, что модуль ускорения тела $a = \frac{F}{m}$, а направление ускорения совпадает с направлением силы.

Как мы уже говорили, единицу силы ньютон (Н) определяют с помощью второго закона Ньютона. А именно:

1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Таким образом,

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

? Под действием некоторой силы тело массой 2 кг движется с ускорением 10 м/с^2 . Чему равен модуль этой силы?

4. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Рассмотрим движение тела под действием одной силы. Для тела, находящегося вблизи поверхности Земли, такой *единственной* силой может быть только *сила тяжести*, потому что она действует на *все* тела.

ЧЕМУ РАВНА СИЛА ТЯЖЕСТИ?

Как вы уже знаете, опыт показывает, что при свободном падении все тела вблизи поверхности Земли движутся с *одинаковым* ускорением, которое называют *ускорением свободного падения* \vec{g} .

Это ускорение обусловлено действием на тело силы тяжести \vec{F}_T . Следовательно, второй закон Ньютона для свободно падающего тела имеет вид

$$\vec{F}_T = m\vec{g}.$$

Таким образом,

сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$, где m — масса тела.

Благодаря тому что сила тяжести пропорциональна массе тела (рис. 8.6), можно измерить массу тела с помощью взвешивания. Как мы покажем ниже, взвешивая тело, мы измеряем действующую на него силу тяжести.

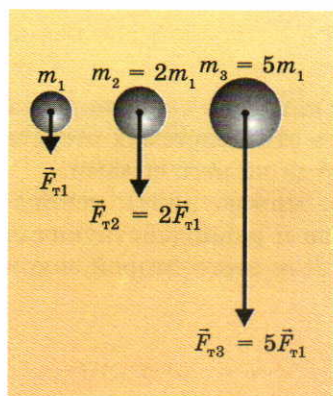


Рис. 8.6. Сила тяжести пропорциональна массе тела



Масса человека 60 кг. Чему равна действующая на него сила тяжести?

СВЯЗАНО ЛИ НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЛА С НАПРАВЛЕНИЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА НЕГО СИЛЫ?

Для тела, падающего из состояния покоя, направление скорости *совпадает* с направлением силы тяжести (рис. 8.7, а). При этом скорость *увеличивается* со временем; зависимость скорости от времени выражается формулой

$$v = gt.$$

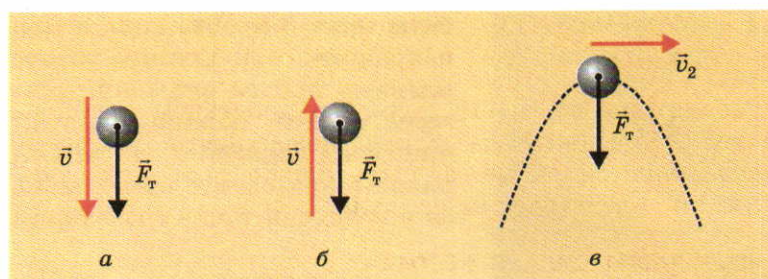


Рис. 8.7. При движении вниз направление скорости совпадает с направлением силы тяжести (а); при движении вверх скорость направлена противоположно силе тяжести (б); для тела, брошенного под углом к горизонту, в верхней точке траектории скорость перпендикулярна силе тяжести (в)

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

Если тело брошено вертикально вверх, то при движении вверх скорость тела направлена *противоположно* силе тяжести (рис. 8.7, б).

В этом случае ускорение тела направлено противоположно скорости. Следовательно, скорость тела будет *уменьшаться* со временем: при движении вверх зависимость скорости от времени выражается формулой

$$v = v_0 - gt,$$

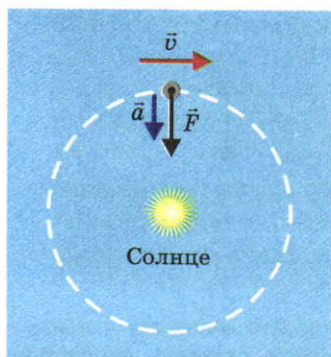
где v_0 — модуль начальной скорости.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

И в этом случае ускорение тела во время всего полета направлено *вниз*, потому что так направлена единственная действующая на тело сила — сила тяжести. Однако теперь начальная скорость тела составляет некоторый *угол* с направлением силы. При этом, как мы видим, тело движется *криволинейно*.

Например, в верхней точке траектории скорость тела направлена *перпендикулярно* силе тяжести (рис. 8.7, в). При движении вблизи этой точки скорость тела изменяется в основном *по направлению*.

Этот случай представляет для нас особый интерес, потому что сила притяжения, которая действует на планету со стороны Солнца, направлена также *перпендикулярно* скорости пла-



неты (рис. 8.8). Эта сила вызывает направленное к Солнцу ускорение планеты при ее движении по *круговой* орбите. Можно сказать, что при своем движении вокруг Солнца планета как бы все время находится в «верхней точке траектории»!

Рис. 8.8. Сила притяжения Солнца перпендикулярна скорости планеты и сообщает ей ускорение, направленное к Солнцу

Итак, из нашего рассмотрения следует такой вывод:

скорость тела может быть направлена *под любым углом* к действующей на тело силе.

Если в данной точке траектории направление скорости *совпадает* с направлением силы, то скорость тела *увеличивается*, а если направление скорости *противоположно* силе, то скорость тела *уменьшается*. Если же скорость направлена *под углом* к силе, то траектория движения тела *криволинейная*.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

5. ОЧЕВИДЕН ЛИ ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Второй закон Ньютона так же не очевиден, как и первый: он тоже может показаться противоречащим здравому смыслу.

На этот раз суть «противоречия» состоит вот в чем. Основанный на наблюдениях здравый смысл говорит нам, что скорость тела направлена так же, как и действующая на это тело сила. Но при рассмотрении движения тела под действием силы тяжести мы убедились, что это не так: скорость тела может быть направлена *под любым углом* к действующей на тело силе. Из-за чего же возникает это расхождение здравого смысла с научным рассмотрением?

Дело в том, что на практике мы часто встречаемся со случаями, когда начальная скорость тела равна нулю. А в этих случаях, как мы уже знаем, скорость, которую приобретает тело вследствие действия силы, действительно направлена так же, как и эта сила.

Но если тело имеет некоторую начальную скорость (например, тело, брошенное вертикально вверх или под углом к горизонту), то направление скорости уже не совпадает с направлением действия силы. И мы на хорошо знакомых примерах убедились, что это действительно так.

Научный подход отличается от так называемого здравого смысла тем, что он основан не на случайных наблюдениях, а на продуманных опытах, в которых изучают *все* возможные варианты протекания природных явлений, а не только те, которые встречаются наиболее часто.

Возвращаясь к неочевидности второго закона Ньютона, обратим внимание на следующее. Согласно этому закону действующая на тело сила определяет не скорость этого тела, а только *изменение скорости* за ближайший малый промежуток времени. Поэтому скорость тела в данный момент зависит еще и от того, как направлена начальная скорость тела.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Масса является мерой инертности тела.
- Отношение масс двух тел обратно отношению ускорений этих тел при их взаимодействии: $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$.
- Второй закон Ньютона: равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.
- Сила тяжести $\vec{F}_t = m\vec{g}$, где m — масса тела. Благодаря тому, что сила тяжести пропорциональна массе тела, массу можно измерять с помощью взвешивания.
- Скорость тела может быть направлена под любым углом к действующей на тело силе. Если скорость тела направлена так же, как сила, тело движется прямолинейно и его скорость увеличивается; если скорость направлена противоположно силе, тело движется прямолинейно и его скорость уменьшается; если скорость направлена под углом к силе, тело движется криволинейно.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Что такое масса тела?
2. При взаимодействии двух тел первое тело приобретает ускорение 1 м/с^2 , а второе — 5 м/с^2 . Масса какого тела больше и во сколько раз?
3. Сформулируйте второй закон Ньютона.
4. Под действием силы 6 Н тело приобретает ускорение 2 м/с^2 . Какова масса тела?
5. Чему равна сила тяжести для тела массой 5 кг ?
6. В каких системах отсчета справедлив второй закон Ньютона?
7. Приведите пример, когда направление скорости тела совпадает с направлением действующей на него силы.
8. Приведите пример, когда направление скорости тела противоположно направлению действующей на него силы.
9. Приведите пример, когда направление скорости тела перпендикулярно направлению действующей на него силы.

Второй уровень

10. Тело массой 5 кг , двигаясь прямолинейно равноускоренно, за 5 с прошло 25 м . Чему равен модуль равнодействующей сил, действующих на это тело? Начальная скорость тела равна нулю.
11. Тормозной путь автомобиля, двигавшегося со скоростью 108 км/ч , равен 90 м . Чему равна сила трения, если масса автомобиля 1 т ?
12. Мяч брошен вертикально вверх. Когда модуль ускорения мяча больше — при подъеме или при спуске? Учтите, что сила сопротивления воздуха направлена противоположно скорости тела.
13. Мяч бросили вертикально вверх. В какой точке траектории ускорение мяча точно равно ускорению свободного падения? При решении учтите силу сопротивления при движении в воздухе.
14. На тело массой 10 кг действуют две силы, направленные вдоль одной прямой. Тело движется с ускорением 2 м/с^2 . Модуль одной силы равен 50 Н . Чему равен модуль другой силы?
15. На тело массой 100 кг действуют две силы, направленные под прямым углом друг к другу. Модуль одной силы 300 Н ,

а модуль другой силы 400 Н. С каким ускорением движется тело?

16. Составьте задачу по теме «Второй закон Ньютона», ответ у которой был бы: «Равнодействующая равна 100 Н».

§ 9.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Третий закон Ньютона
2. Свойства сил, с которыми тела взаимодействуют
3. Примеры проявления и применения третьего закона Ньютона
- 4. Почему вес покоящегося тела равен силе тяжести?
- 5. Вес тела, движущегося с ускорением
- 6. Невесомость
- 7. Очевиден ли третий закон Ньютона?

1. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Наблюдения и опыты свидетельствуют, что при взаимодействии двух тел на *каждое* из них действует сила со стороны *другого* тела. Например, если вы бьете рукой по мячу, то вы ощущаете, что и мяч «бьет» по вашей руке.

Это означает, что

при взаимодействии тела действуют друг на друга с некоторыми силами.

Каково же соотношение между силами?



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Соединим два динамометра и будем тянуть их в разные стороны, как показано на рис. 9.1.

Мы увидим, что показания динамометров будут *одинаковыми*.

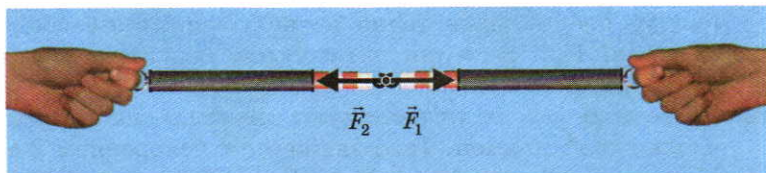


Рис. 9.1. Динамометры действуют друг на друга с силами, равными по модулю и направленными противоположно

Этот и другие подобные опыты свидетельствуют, что выполняется

третий закон Ньютона: при любом взаимодействии тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению:

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

2. СВОЙСТВА СИЛ, С КОТОРЫМИ ТЕЛА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ

Силы, с которыми два тела взаимодействуют друг с другом, имеют *одну и ту же физическую природу*.

Рассмотрим примеры.

1. На любое тело, находящееся вблизи поверхности Земли, действует *сила тяготения* со стороны Земли (сила тяжести).

Эта сила действует на тело независимо от того, падает оно (рис. 9.2, а) или покоится (рис. 9.2, б). Со стороны тела на Землю действует сила притяжения, в точности равная по модулю силе тяжести. Почему же действие этой силы на Землю остается незаметным? Попробуйте догадаться сами! Ниже вы найдете разгадку.

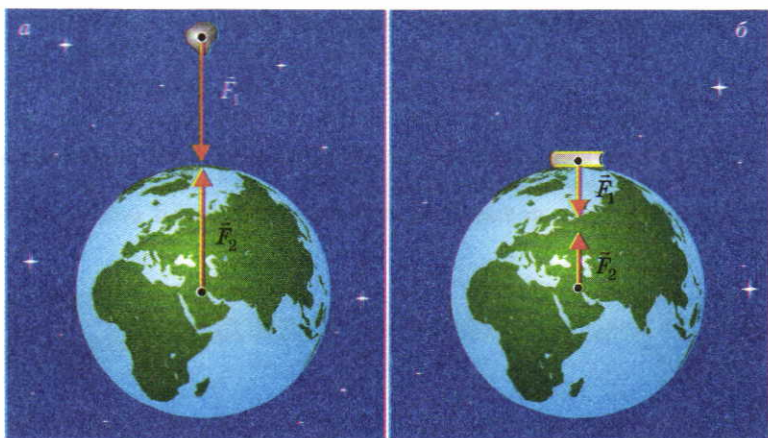


Рис. 9.2. Силы тяготения, с которыми Земля и тело притягивают друг друга. Масштаб на рисунке не соблюден

2. Лежащая на столе книга (рис. 9.3) давит на опору с силой \vec{P} (это — вес книги), а стол — на книгу с силой \vec{N} (сила нормальной реакции). Обе эти силы по своей физической природе являются *силами упругости*.

3. Если толкнуть лежащий на столе брусок, он начнет скользить по столу — проедет некоторое расстояние и остановится. Уменьшение скорости бруска при скольжении обусловлено *силой трения*, действующей на него со стороны стола. Такая же по модулю, но противоположно направленная сила трения действует и на стол со стороны бруска (рис. 9.4). Действие силы трения на стол можно сделать более заметным, если положить на стол ткань: мы увидим, что движущийся брусок тянет ткань за собой.

Могут ли силы, с которыми взаимодействуют тела, уравновешивать друг друга? Нет, не могут, хотя они равны по модулю и направлены противоположно! Дело в том, что эти силы действуют на *разные* тела, а уравновешивать друг друга могут только силы, приложенные к *одному и тому же* телу.

? На столе лежит книга. Какие силы действуют на нее? Уравновешивают ли они друг друга? Имеют ли они одинаковую физическую природу? Связаны ли эти силы третьим законом Ньютона?

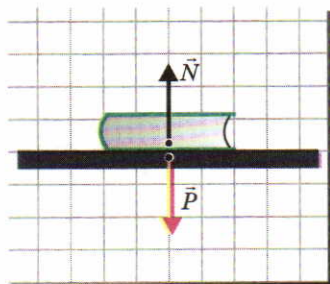


Рис. 9.3. Силы упругости, с которыми книга и стол давят друг на друга

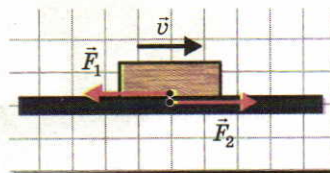


Рис. 9.4. Силы трения, с которыми скользящий брусок и стол действуют друг на друга

3. ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

ХОДЬБА

Каждый из нас с детства применяет третий закон Ньютона по много раз в день, даже не подозревая об этом.

Например, каждый раз, когда вы начинаете идти, вы получаете *ускорение в горизонтальном направлении*. Согласно

второму закону Ньютона это означает, что на вас действует *горизонтально направленная сила*. Что же это за сила? Со стороны какого тела она приложена?

Этой силой является *сила трения*, действующая на идущего человека со стороны дороги. Идущий человек толкает дорогу¹ *назад*, а дорога при этом согласно *третьему закону Ньютона* с такой же по модулю силой толкает человека *вперед* (рис. 9.5, а)!

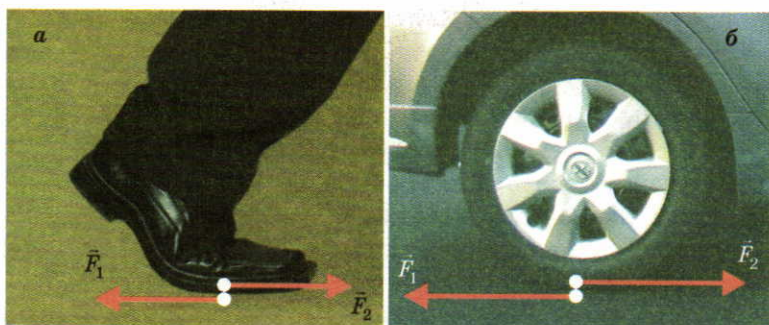


Рис. 9.5. Отталкивание от дороги с помощью силы трения покоя

? Почему на льду трудно разогнаться?

СИЛА ТЯГИ

Автомобиль разгоняется, тоже «используя» третий закон Ньютона: мотор вращает колесо автомобиля, а оно вследствие этого толкает дорогу *назад*. При этом согласно третьему закону Ньютона дорога толкает автомобиль *вперед* (рис. 9.5, б).

Направленную вперед силу, действующую на автомобиль со стороны дороги, иногда называют *силой тяги*.

Использует третий закон Ньютона и гребец: отталкиваясь веслами от воды, он толкает воду назад, а вода толкает гребца вместе с лодкой вперед (рис. 9.6).

А как может изменить свою скорость тело, если вокруг него ничего нет и не от чего оттолкнуться: например, если это тело — космический корабль, находящийся в открытом космосе? Ответ на этот вопрос нашел российский ученый и изобретатель К. Э. Циолковский. Об этом мы расскажем в § 12. *Импульс. Закон сохранения импульса*.

¹ Дорóгой мы для краткости называем дорожное полотно.

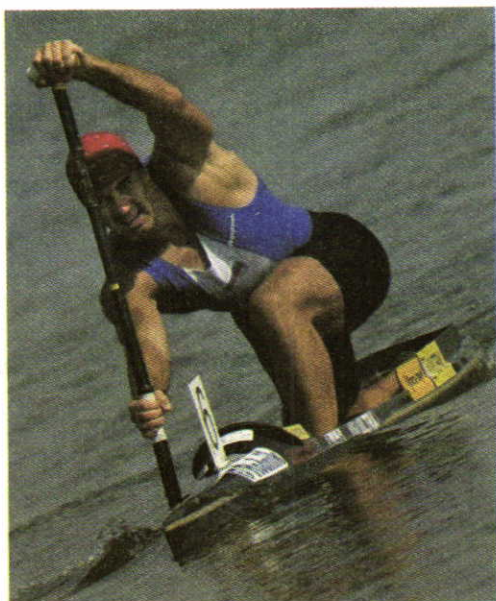


Рис. 9.6. Гребец отталкивается веслом от воды

СИЛА НАТЯЖЕНИЯ НИТИ ИЛИ ТРОСА

Рассмотрим задачу, при решении которой многие допускают ошибки.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Нить тянут за концы в противоположные стороны с силами \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 9.7). Равны ли эти силы по модулю, если *массой нити можно пренебречь*? Чему равна сила натяжения нити, если $F_1 = 10 \text{ Н}$?

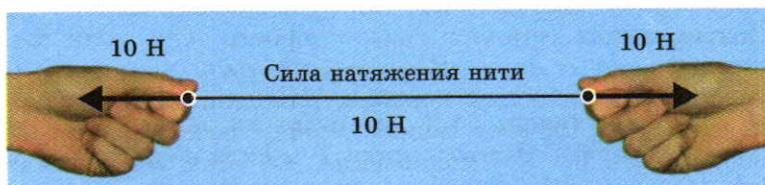


Рис. 9.7. К задаче

Решение. Предположим, что силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 не равны по модулю, тогда их равнодействующая \vec{F} не равна нулю. Значит, согласно второму закону Ньютона нить приобретет ускорение $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, где m — масса нити.

А теперь обратим внимание на оговорку в условии, выделенную курсивом: именно в ней вся «соль» задачи! Поскольку масса нити пренебрежимо мала, то нить приобрела бы огромное ускорение, если бы равнодействующая \vec{F} не была равна нулю. Поэтому мы можем сделать такой вывод: *если к концам нити, массой которой можно пренебречь, приложены противоположно направленные силы, то эти силы равны по модулю.*

Силой натяжения нити в таком случае является сила, приложенная к *любому* концу нити. В данном случае сила натяжения нити равна 10 Н.

Ответ: силы равны по модулю; сила натяжения нити 10 Н.

Распространенными ошибками при решении этой задачи являются ответы 0 и 20 Н. Чтобы эти ошибки стали очевидными, представьте, что один конец нити прикреплен к кольцу, укрепленному в стене. Тогда если тянуть эту нить силой 10 Н, то очевидно, что сила натяжения нити равна 10 Н. Но ведь согласно третьему закону Ньютона кольцо при этом «тянет» нить тоже силой 10 Н!



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

4. ПОЧЕМУ ВЕС ПОКОЯЩЕГОСЯ ТЕЛА РАВЕН СИЛЕ ТЯЖЕСТИ?

Рассмотрим для примера силы, действующие на лежащую на столе книгу. Это сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и сила нормальной реакции \vec{N} (см. рис. 7.2). Они уравнивают друг друга, поэтому

$$\vec{N} = -m\vec{g}.$$

Рассмотрим теперь силы, с которыми действуют друг на друга книга и стол. Это вес книги \vec{P} и сила нормальной реакции \vec{N} (см. рис. 7.1). Согласно третьему закону Ньютона

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$

Из уравнений $\vec{P} = -\vec{N}$ и $\vec{N} = -m\vec{g}$ следует, что

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

Поскольку вес покоящегося тела равен силе тяжести, а сила тяжести пропорциональна массе тела, то массу тела, как мы уже говорили, часто измеряют с помощью *взвешивания* (рис. 9.8).



Рис. 9.8. Взвешивание — самый распространенный способ измерения массы

Вес равен силе тяжести не только для покоящегося тела, но и для тела, движущегося с постоянной скоростью, поскольку и в этом случае действующие на тело сила тяжести и сила нормальной реакции уравновешивают друг друга.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Через неподвижный блок перекинута невесомая нерастяжимая нить, к концам которой подвешены грузы равной массы m . Чему равна сила натяжения нити, если трением в блоке можно пренебречь?

Решение. Грузы равной массы, подвешенные на концах нити, переброшенной через блок, будут находиться в равновесии,

то есть будут либо покоиться, либо двигаться с постоянной скоростью. В таком случае, как мы уже знаем, вес тела равен силе тяжести. А вес — это и есть сила, с которой груз растягивает подвес. В данном случае вес каждого груза по модулю равен mg . Значит, сила натяжения нити равна mg .

Ответ: mg .

5. ВЕС ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ С УСКОРЕНИЕМ



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Подвешенный на тросе груз массой 100 кг движется с направленным вверх ускорением, равным по модулю $2 \frac{m}{c^2}$. Чему равна сила натяжения троса?

Решение. На груз действуют две силы — сила тяжести \vec{F}_τ и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, приложенная со стороны троса. Эти силы направлены *противоположно*: сила тяжести направлена вниз, а сила упругости — вверх.

По условию ускорение груза направлено *вверх* — значит, вверх направлена и равнодействующая этих сил. Равнодействующая двух противоположно направленных сил направлена в сторону большей из этих сил, поэтому в данном случае сила упругости (сила натяжения троса) больше силы тяжести.

Для противоположно направленных сил модуль равнодействующей F равен разности модулей этих сил. Значит,

$$F = F_{\text{упр}} - F_\tau.$$

Из уравнения второго закона Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$ получаем

$$F_{\text{упр}} - F_\tau = ma.$$

Отсюда

$$F_{\text{упр}} = F_\tau + ma = mg + ma = m(g + a).$$

Подставив числовые данные, получим $F_{\text{упр}} = 1200$ Н.

Ответ: 1200 Н.

Обратите внимание: если ускорение груза направлено *вверх*, то сила натяжения троса *больше* действующей на груз силы тяжести. По третьему закону Ньютона с такой же по модулю силой груз растягивает трос. А сила, с которой груз растягивает трос, — это и есть по определению вес груза. Итак, если груз движется с ускорением, направленным вверх, то вес груза

$$P = m(g + a).$$

Рассуждая аналогично, можно доказать, что если ускорение тела направлено вниз (но не больше по модулю, чем ускорение свободного падения), то вес тела

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

Из этой формулы следует, в частности, что если тело движется с ускорением, равным ускорению свободного падения, то его вес равен *нулю*. Рассмотрим этот случай подробнее.

6. НЕВЕСОМОСТЬ

Когда тело свободно падает, оно не давит на опору и не растягивает подвес. А это значит, что *вес свободно падающего тела равен нулю*.

Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют *невесомостью*.

Обратите внимание: в состоянии невесомости вес тела равен нулю, но сила тяжести по-прежнему равна $m\vec{g}$!

В состоянии невесомости находятся все тела, на которые действует *только* сила тяжести, например, космонавты во время полета при выключенных двигателях. В этом случае космический корабль и все находящиеся в нем тела движутся только под действием силы тяжести, то есть находятся в состоянии невесомости.

На короткое время вы можете стать невесомым, просто подпрыгнув. С того момента, когда ваши ноги оторвутся от пола, и до того момента, когда они коснутся пола вновь, вы будете находиться в состоянии невесомости: ведь при этом вы не давите на опору и не растягиваете подвес. Яркие впечатления от ощущения невесомости можно получить, прыгая на батуте¹ (рис. 9.9). Но, конечно, за время краткого пребывания

¹ Батут — это туго натянутая сетка для прыжков-подскоков.

В невесомости нельзя почувствовать невесомость так, как ее ощущают космонавты.



Рис. 9.9. Невесомость во время прыжка на батуте

7. ОЧЕВИДЕН ЛИ ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?

Несмотря на простоту формулировки третий закон Ньютона так же не очевиден, как и два первых.

Дело в том, что *равные по модулю* силы, с которыми взаимодействуют два тела, далеко не всегда проявляют себя *одинаково заметно*. Рассмотрим примеры.

Падение камня. Когда камень падает, изменение его скорости вследствие действия силы притяжения Земли хорошо заметно: скорость камня за каждую секунду увеличивается примерно на $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

На Землю со стороны камня действует точно такая же по модулю сила притяжения. Но вследствие того, что масса Земли во много раз больше массы камня, ускорение Земли, обусловленное притяжением камня, чрезвычайно мало. Заметить или измерить это ускорение Земли невозможно.

? Во сколько раз ускорение Земли, обусловленное притяжением к камню массой 10 кг, меньше ускорения свободного падения? Массу Земли примите равной $6 \cdot 10^{24}$ кг.

Удар по мячу. Когда футболист бьет по мячу, мяч резко изменяет скорость, но скорость самого футболиста при этом почти не изменяется. На этот раз объяснение состоит не только в том, что масса футболиста намного больше массы мяча. Важно еще и то, что на футболиста со стороны Земли действует большая сила трения: именно для того, чтобы увеличить ее, футболисты и надевают бутсы с шипами. Если бы футболист бил по мячу, стоя на льду в обуви с гладкими подошвами, он при ударе тоже приобрел бы заметную скорость.

«Неочевидность» кажущихся простыми законов природы (в том числе трех законов Ньютона) не случайна. Чтобы в сложных и взаимосвязанных явлениях природы заметить простую закономерность, нужна проницательность настоящего ученого.

Изучая физику, вы и сегодня сталкиваетесь с той же «странностью» и «неочевидностью» законов природы, которая долгое время «мешала» людям увидеть эти закономерности и открыть законы природы.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Третий закон Ньютона: при любом взаимодействии тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.
- Свойства сил, с которыми тела взаимодействуют друг с другом: они всегда имеют одинаковую физическую природу и не уравнивают друг друга, поскольку приложены к разным телам.
- Вес свободно падающего тела равен нулю. Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют невесомостью.



Первый уровень

1. Какие наблюдения указывают на то, что тела действуют друг на друга?
2. Сформулируйте третий закон Ньютона.
3. Одинаковую ли физическую природу имеют силы, с которыми тела взаимодействуют друг с другом?
4. Приведите пример, когда два тела взаимодействуют посредством сил упругости.
5. Приведите пример, когда два тела взаимодействуют посредством сил тяготения.
6. Приведите пример, когда два тела взаимодействуют посредством сил трения.
7. Могут ли силы, с которыми два тела взаимодействуют друг с другом, уравновешивать одна другую?
8. Почему равные по модулю силы, с которыми два тела взаимодействуют, не всегда проявляют себя одинаково заметно? Приведите примеры, когда действие одной из этих сил остается незамеченным.
9. Мать говорит маленькому сыну: «Не тяни меня за руку!» А сын отвечает матери: «Я не тяну, а только держу. Ты сама тянешь!» Кто из них прав?

Второй уровень

10. Движущийся бильярдный шар сталкивается с таким же покоящимся шаром. Ускорение какого шара при ударе больше?
11. Как доказать, что вес покоящегося тела равен силе тяжести?
12. Всегда ли вес тела равен действующей на это тело силе тяжести?
13. Почему хорошая дорога должна быть с твердым покрытием?
14. Что такое невесомость? При каком условии тело находится в состоянии невесомости?
15. Лошадь трогает с места тележку. Согласно третьему закону Ньютона лошадь и тележка действуют друг на друга с одинаковыми по модулю и противоположно направленными силами. Почему же тогда лошадь с тележкой движутся с ускорением, направленным вперед?
16. Две группы ребят соревнуются в перетягивании каната, и одна группа побеждает. Но как в этом соревновании вооб-

ще может быть победитель, если согласно третьему закону Ньютона обе группы тянут канат с одинаковыми по модулю силами? Считайте, что массой каната можно пренебречь.

17. Составьте задачу по теме «Третий закон Ньютона», ответ у которой был бы: «Сила натяжения троса равна 200 Н».

§ 10.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

1. Закон всемирного тяготения
2. Движение искусственных спутников Земли и космических кораблей
- 3. Как был открыт закон всемирного тяготения?
- 4. Как «взвесили» Землю?
- 5. Как найти первую космическую скорость?

1. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Как вы уже знаете, планеты движутся вокруг Солнца потому, что их притягивает Солнце. Если бы в какой-то момент сила притяжения к Солнцу исчезла, планета унеслась бы в космическое пространство, двигаясь по инерции, то есть прямолинейно и равномерно (рис. 10.1).

Луна движется вокруг Земли тоже вследствие притяжения ее к Земле.

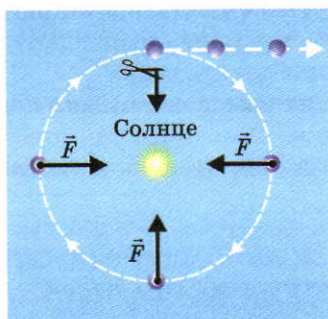


Рис. 10.1. Если бы притяжение Солнца исчезло, планета улетела бы по касательной к своей траектории

Во второй половине 17-го века И. Ньютон догадался, что притяжение космических тел друг к другу имеет ту же природу, что и сила тяжести, с которой Земля притягивает тела.

Используя астрономические данные и проведя расчеты, Ньютон сформулировал

закон всемирного тяготения: две материальные точки с массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягивают друг друга с силами, прямо пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними¹. Модуль каждой силы

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

Коэффициент пропорциональности G называют *гравитационной постоянной*. Измерения показали, что $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Ниже мы расскажем, как впервые была измерена гравитационная постоянная (см. раздел «Как «взвесили» Землю?»).

? Как изменится сила притяжения между двумя материальными точками, если расстояние между ними увеличить в 3 раза?

Три шара 1, 2, 3 равной массы расположены вдоль одной прямой. Где находится шар 3 по отношению к шарам 1 и 2, если равнодействующая сил тяготения, действующих на шар 3 со стороны шаров 1 и 2, равна нулю?

Физический смысл гравитационной постоянной. Гравитационная постоянная численно равна силе, с которой одна материальная точка массой 1 кг притягивает другую такую же материальную точку, находящуюся на расстоянии 1 м от нее. Эта сила очень мала: она равна $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н, что в несколько миллионов раз меньше веса комара!

Такую силу можно измерить только с помощью очень чувствительных приборов. Вот почему в повседневной жизни мы замечаем притяжение тел только к Земле, имеющей огромную массу.

2. ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

В одной из своих книг И. Ньютон описывает такой мысленный эксперимент. Представим себе, что на очень высокой горе установили огромную пушку и стреляют из нее в горизонтальном направлении (рис. 10.2).

¹ Это справедливо также для однородных шаров, даже если расстояние между их центрами сравнимо с радиусами шаров. В таком случае расстоянием R следует считать расстояние между центрами шаров.

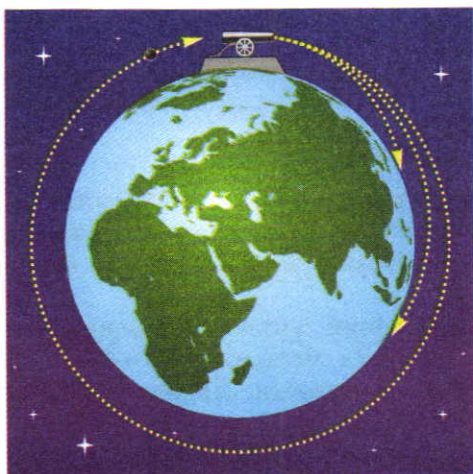


Рис. 10.2. Мысленный эксперимент Ньютона: рождение идеи об искусственном спутнике Земли

Вследствие притяжения к Земле траектория снаряда будет искривляться. И если скорость снаряда не очень велика, то он в конце концов упадет на Землю. Однако чем больше начальная скорость снаряда, тем дальше он пролетит!

И при некоторой скорости снаряд вообще не упадет на Землю: он будет лететь *вдоль поверхности Земли, двигаясь по окружности*. Таким образом, этот снаряд станет *искусственным спутником Земли*!

Минимальную скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называют *первой космической скоростью*. Она равна примерно $8 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Ниже мы покажем, как найти значение первой космической скорости.

В наши дни мысленный эксперимент Ньютона стал реальностью. Сегодня в космосе постоянно «обитают» сотни искусственных спутников, а также космические станции. Спутники связи позволяют нам принимать любую из сотен телевизионных программ и беседовать по мобильному телефону с жителем любой страны.

Первый искусственный спутник Земли был запущен в 1957 году в Советском Союзе. Об освоении космоса мы расскажем подробнее в § 12. *Импульс. Закон сохранения импульса.*



3. КАК БЫЛ ОТКРЫТ ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ?

Ньютон рассказывал, что идея о всемирном тяготении родилась у него, когда ему было всего 23 года. Он сидел в саду, размышляя о проблемах мироздания, и вдруг заметил, что упало яблоко.

Яблоко при падении движется с ускорением, *направленным к Земле*, подумал молодой Ньютон. И Луна, двигаясь вокруг Земли по окружности, движется с ускорением, тоже *направленным к Земле*.

Так, может, это направленное к Земле ускорение для обоих тел — яблока и Луны — обусловлено тем, что Земля *притягивает* эти тела? Тогда эти силы притяжения могут иметь *одну и ту же физическую природу* (рис. 10.3). А может быть, ту же самую природу имеет и притяжение планет к Солнцу?

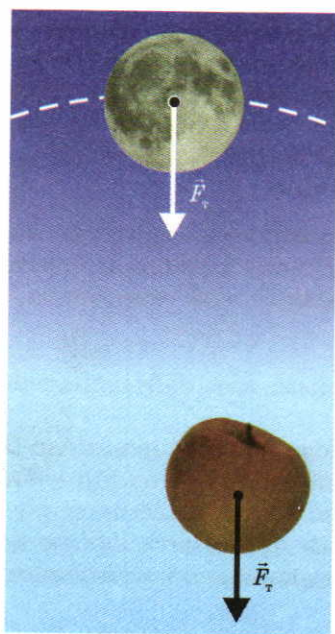


Рис. 10.3. Притяжение Луны и яблока к Земле имеет одну и ту же физическую природу

Эта мысль захватила Ньютона: он чувствовал, что близок к разгадке одной из важнейших в то время загадок мироздания.

Загоревшись осенившей его идеей, Ньютон посвятил ей двадцать лет исследований, создав при этом новые разделы математики (дифференциальное и интегральное исчисление). В результате он открыл закон всемирного тяготения и сформулировал «три закона Ньютона». Эти открытия принесли ему славу величайшего ученого.

Одной из «подсказок», которая помогла Ньютону открыть закон всемирного тяготения, была закономерность в движении планет, установленная немецким астрономом Иоганном Кеплером в начале 17-го века. Вы познакомитесь с ней в курсе физики старших классов.

4. КАК «ВЗВЕСИЛИ» ЗЕМЛЮ?

Чтобы найти значение гравитационной постоянной G , надо было измерить силу притяжения двух тел *известной* массы, находящихся на известном расстоянии друг от друга.

Это смог сделать в конце 18-го века английский ученый Генри Кавендиш: ему удалось измерить чрезвычайно малые силы притяжения между металлическими шарами. На рис. 10.4 показана схема опыта Кавендиша.

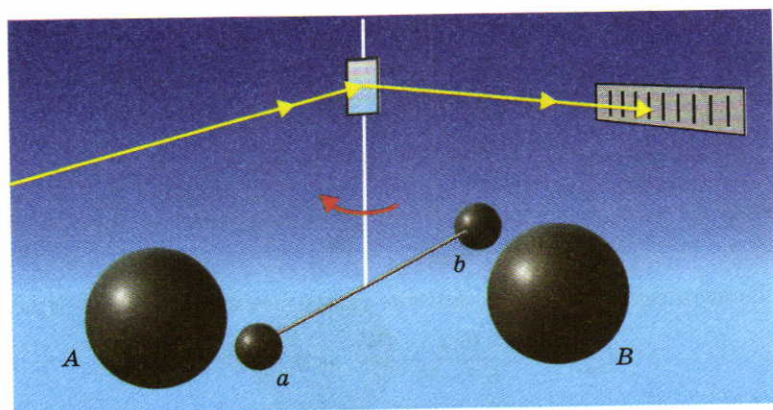


Рис. 10.4. Схема опыта Кавендиша по измерению гравитационной постоянной

На тонкой нити подвешен легкий горизонтальный стержень с небольшими металлическими шарами a и b . Они при-

тягиваются к большим металлическим шарам A и B . Силу притяжения между шарами можно измерить по углу поворота нити. Чтобы измерить этот угол точнее, Кавендиш прикрепил к нити маленькое зеркальце и следил за перемещением «зайчика» при повороте нити.

Почему опыт Кавендиша называли «взвешиванием Земли»? Дело в том, что измерение гравитационной постоянной позволило впервые определить массу Земли. В то время ускорение свободного падения g и радиус Земли $R_{\text{Зем}}$ были уже измерены с хорошей точностью. А найдя из опыта значение гравитационной постоянной G и подставив его в формулу закона всемирного тяготения, можно узнать массу Земли. Как это сделать, мы рассмотрим в следующей задаче.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Найдем массу Земли, зная значение ускорения свободного падения, гравитационную постоянную и радиус Земли (примем его равным 6400 км).

Решение. Мы уже знаем, что сила тяжести $F_{\text{т}} = mg$. А поскольку сила тяжести является частным случаем силы всемирного тяготения, то можно написать для нее и другое выражение:

$$F_{\text{т}} = G \frac{mM_{\text{Зем}}}{R_{\text{Зем}}^2},$$

где $M_{\text{Зем}}$ — масса Земли, $R_{\text{Зем}}$ — радиус Земли. Сравнивая эти выражения для силы тяжести, получаем

$$mg = G \frac{mM_{\text{Зем}}}{R_{\text{Зем}}^2},$$

откуда

$$M_{\text{Зем}} = \frac{gR_{\text{Зем}}^2}{G}.$$

Подставляя числовые данные (выраженные в СИ), получим

$$M_{\text{Зем}} = \frac{10 \cdot (6,4 \cdot 10^6)^2}{6,7 \cdot 10^{-11}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ (кг)}.$$

Это огромная масса (6 миллионов миллионов миллионов миллионов килограммов). Но, как мы скоро узнаем (см. § 23. *Солнечная система*), Земля — очень небольшая планета по сравнению с планетами-гигантами. Масса наибольшей из них (Юпитера) примерно в 300 раз больше массы Земли!

Ответ: $6 \cdot 10^{24}$ кг.

5. КАК НАЙТИ ПЕРВУЮ КОСМИЧЕСКУЮ СКОРОСТЬ?

Найдем значение первой космической скорости, то есть скорости искусственного спутника Земли на околоземной орбите. Так называют орбиту, радиус которой практически равен радиусу Земли $R_{\text{зем}}$.

На искусственный спутник, который движется по околоземной орбите, действует сила тяжести, равная по модулю mg , где g — ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли. Под действием этой силы спутник движется с ускорением, равным по модулю g и направленным к центру Земли.

С другой стороны, мы уже знаем (см. § 5. *Равномерное движение по окружности*), что если тело движется со скоростью v по окружности радиусом R , то оно движется с ускорением $a = \frac{v^2}{R}$. Следовательно, $\frac{v^2}{R_{\text{зем}}} = g$, откуда

$$v = \sqrt{R_{\text{зем}} g} \approx 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Закон всемирного тяготения: две материальные точки с массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягивают друг друга силами, прямо пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Модуль каждой силы $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$. Закон всемирного тяготения открыл Ньютон.
- Коэффициент пропорциональности G называют гравитационной постоянной. Измерения показали, что $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Первым измерил гравитационную постоянную Кавендиш.
- Минимальную скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называют первой космической скоростью. Она равна примерно $8 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.



Первый уровень

1. Как двигались бы планеты, если бы притяжение Солнца исчезло?
2. Как зависят силы притяжения двух тел от их масс?
3. Два красных шара одинаковой массы притягиваются силой F , а два зеленых шара одинаковой массы, находящиеся на таком же расстоянии друг от друга, притягиваются силой $9F$. Во сколько раз масса зеленого шара больше массы красного?
4. Как зависит сила притяжения двух материальных точек от расстояния между ними?
5. Как изменилось расстояние между двумя шарами, если сила притяжения между ними уменьшилась в 36 раз?
6. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Кто открыл этот закон?
7. Почему мы не замечаем гравитационного притяжения между окружающими нас телами?
8. Что такое первая космическая скорость? Чему она равна?

Второй уровень

9. Как была измерена гравитационная постоянная? Почему этот опыт называли «взвешиванием Земли»?
10. Сравните ускорение свободного падения на поверхности Земли, Луны и Солнца. Массы Луны и Солнца примите равными $7,3 \cdot 10^{19}$ и $2 \cdot 10^{27}$ т, а их радиусы $1,7 \cdot 10^3$ и $7 \cdot 10^5$ км.
11. Вычислите первую космическую скорость для Луны. Массу и радиус Луны примите равными соответственно $7,3 \cdot 10^{19}$ т и $1,7 \cdot 10^3$ км.
12. Центры шаров массами 1 и 4 кг находятся на расстоянии 3 м друг от друга. Где надо поместить третий шар, чтобы равнодействующая сил тяготения, действующих на него со стороны первых двух, была равна нулю? Почему ответ не зависит от массы третьего шара?
13. Два спутника движутся по круговым орбитам вокруг Земли. Высота орбиты первого спутника больше. Скорость какого спутника больше?
14. Составьте задачу по теме «Всемирное тяготение», ответ у которой был бы: «В 100 раз».

§ 11. СИЛЫ ТРЕНИЯ

1. Сила трения скольжения
2. Сила трения покоя
3. Сила сопротивления при движении в жидкости или газе
4. Тормозной путь автомобиля
5. Движение под действием силы тяги и силы сопротивления

1. СИЛА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Толкните лежащую на столе книгу. После толчка движение книги будет замедляться, и она вскоре остановится. Скорость книги изменялась, потому что на нее со стороны стола действовала *сила трения скольжения*.

Силы трения скольжения действуют между соприкасающимися телами, когда они движутся друг относительно друга. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы уменьшить скорость их относительного движения.

Как мы уже говорили, силы трения скольжения обусловлены главным образом зацеплением неровностей соприкасающихся тел. Схематически это изображено на рис. 11.1. Поэтому чем более гладкие поверхности тел, тем меньше силы трения между ними. Если поверхности настолько гладкие, что силами трения можно пренебречь, на это указывают часто, используя в условии задачи слово «гладкий»: например, «брусok скользит по гладкому столу».

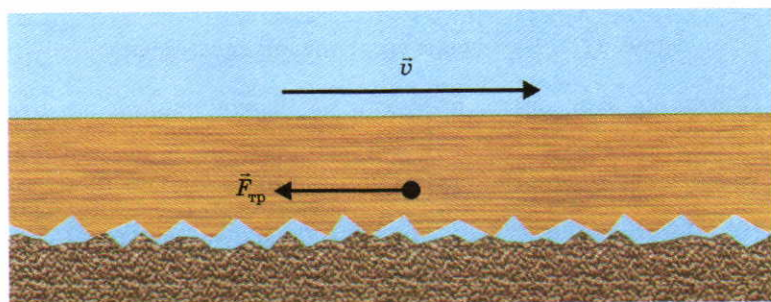


Рис. 11.1. Силы трения скольжения обусловлены зацеплением неровностей на поверхностях тел

От чего же зависит сила трения скольжения?



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Чтобы измерить силу трения скольжения, действующую на брусок со стороны стола, будем тянуть брусок по столу так, чтобы он двигался с постоянной скоростью. При этом приложенная к бруску сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ уравнивает силу трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр}}$, а это означает, что модули этих сил равны. Значит, по показаниям динамометра можно определить модуль силы трения (рис. 11.2, а).

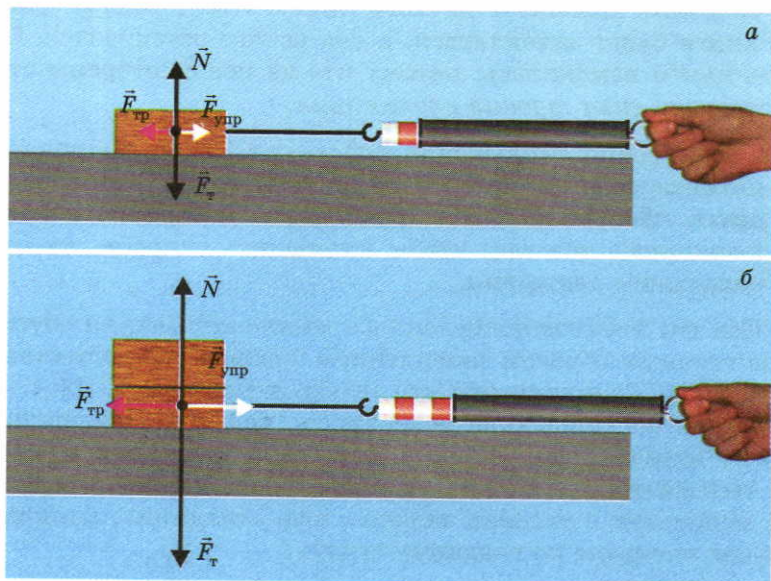


Рис. 11.2. Измерение силы трения скольжения

Повторим этот опыт, положив на брусок *такой же* второй брусок (рис. 11.2, б). Мы увидим, что сила трения скольжения увеличилась в 2 раза.

По какой же причине увеличилась сила трения? Чтобы ответить на этот вопрос, посмотрим, какие еще силы действуют на брусок. Это сила тяжести \vec{F}_g и равная ей по модулю, но направленная противоположно сила нормальной реакции \vec{N} . В случае двух брусков сила тяжести (а значит, и сила нормальной реакции) увеличилась *тоже в 2 раза*. Этот и другие подобные опыты показывают, что

модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр}}$ пропорционален модулю силы нормальной реакции N . Поэтому можно записать

$$F_{\text{тр. ск}} = \mu N.$$

Коэффициент пропорциональности μ называют *коэффициентом трения*. Его определяют из опыта (см. лабораторную работу № 6).

Если тело перемещают по *горизонтальной* поверхности, прикладывая горизонтально направленную силу, то сила нормальной реакции равна по модулю силе тяжести. Поэтому в этом случае соотношение $F_{\text{тр. ск}} = \mu N$ принимает вид

$$F_{\text{тр. ск}} = \mu mg.$$

? При равномерном движении бруска массой 1 кг по столу к бруску прикладывают горизонтально направленную силу 3 Н. Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?

Обратите внимание на то, что соотношение между силой трения скольжения и силой нормальной реакции *нельзя* записывать в векторном виде, потому что эти силы не направлены одинаково: сила нормальной реакции перпендикулярна поверхностям соприкасающихся тел, а сила трения скольжения направлена вдоль этих поверхностей.

Ниже приведены значения коэффициента трения для некоторых видов поверхностей:

Сталь по льду	0,015
Сталь по стали	0,03—0,09
Дерево по дереву	0,2—0,5
Шины по сухому асфальту	0,5—0,7
Шины по мокрому асфальту	0,35—0,45
Шины по гладкому льду	0,15—0,20

Как видно из приведенной таблицы, коэффициент трения шин по мокрому асфальту (а тем более по льду) в несколько раз меньше коэффициента трения шин по сухому асфальту.

Вследствие этого на мокром асфальте и на льду в несколько раз увеличивается тормозной путь автомобиля (расстояние, которое он проедет до полной остановки).

Поэтому будьте особенно осторожны на дороге во время дождя и тем более гололеда!

2. СИЛА ТРЕНИЯ ПОКОЯ

Почему так трудно сдвинуть с места тяжелый шкаф (рис. 11.3)? Ведь на *покоящийся* шкаф не может действовать сила трения *скольжения*!

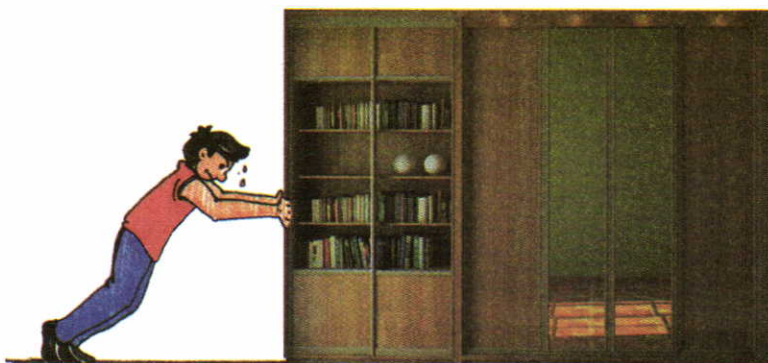


Рис. 11.3. Сдвинуть шкаф мешает действующая на него со стороны пола сила трения покоя

На шкаф со стороны пола действует *сила трения покоя*. Согласно третьему закону Ньютона сила трения покоя действует и на пол со стороны шкафа. Эти силы действуют только до тех пор, пока к шкафу приложена «сдвигающая» сила: ведь ее-то и уравнивает сила трения покоя! Итак,

силы трения покоя действуют между соприкасающимися телами, когда одно из них пытается сдвинуть относительно другого. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы препятствовать относительному движению тел.

Причина возникновения сил трения покоя та же, что и сил трения скольжения: это главным образом зацепление неровностей соприкасающихся тел.

Максимальная сила трения покоя. Если увеличивать приложенную к шкафу силу, мы все-таки сдвинем его. Значит, сила трения покоя не превышает некоторого «предельного»

значения, называемого *максимальной силой трения покоя*. Опыт показывает, что максимальная сила трения покоя примерно равна силе трения скольжения.

Может ли сила трения покоя приводить тело в движение? Мы встречаемся с этим *на каждом шагу* в буквальном смысле слова!

Вспомните: при обсуждении применения третьего закона Ньютона мы говорили, что, делая шаг, человек *отталкивается* от дороги (см. § 9. Третий закон Ньютона). А ведь при этом между ногой и дорогой действуют именно силы трения *покоя*! Чтобы убедиться в этом, вспомните, что отпечаток подошвы на дороге получается *четким*, а это указывает на то, что во время отталкивания подошва покоилась относительно дороги.

Автомобили разгоняет тоже *сила трения покоя*: на это указывают четкие отпечатки рисунка шин. Когда вращающиеся колеса автомобиля «толкают» с помощью силы трения покоя дорожное полотно назад, со стороны дорожного полотна на колеса автомобиля действует тоже сила трения покоя, но направленная вперед. Эту силу, как мы уже говорили, называют силой тяги. Может показаться странным, что сила тяги по своей физической природе является силой трения покоя. Но, как мы с вами убедились, это действительно так!



Почему на льду колеса буксуют?



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. СИЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗЕ

Когда тело движется в жидкости или газе (например, в воздухе), на тело со стороны жидкости или газа действует *сила сопротивления*.

Так же, как и сила трения скольжения, она направлена противоположно скорости тела. Но между этими силами есть и важное отличие. Сила трения скольжения почти не зависит от скорости тела, а *сила сопротивления при движении в жидкости или газе с увеличением скорости увеличивается*.

Сила же трения покоя при движении в жидкости или газе отсутствует вообще. Убедиться в этом нетрудно: даже ребенок, потянув за веревку, может сдвинуть плавающую на поверхности воды тяжелую лодку.

Силу сопротивления движению можно существенно уменьшить, если придать телу так называемую обтекаемую форму. Это — знакомая вам форма самолетов, гоночных автомобилей и быстрых обитателей моря, например дельфинов (рис. 11.4).



Рис. 11.4. Благодаря обтекаемой форме самолетов, автомобилей и дельфинов сила сопротивления при движении с большой скоростью значительно уменьшается

4. ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ АВТОМОБИЛЯ

Напомним, что тормозным путем автомобиля называют путь, который автомобиль проходит при торможении до полной остановки. При решении следующей задачи мы обнаружим некоторые интересные особенности тормозного пути.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Чему равен тормозной путь автомобиля массой 1 т, если он движется по сухому асфальту со скоростью $60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$? Примем коэффициент трения шин по сухому асфальту равным 0,6. Есть ли в условии задачи лишние данные?

Решение. В § 4. Путь при прямолинейном равноускоренном движении мы выразили тормозной путь l автомобиля через модуль его начальной скорости v_0 и модуль ускорения a при торможении. Напомним, что $l = \frac{v_0^2}{2a}$.

Ускорение автомобиля вызвано действием силы трения покоя. При максимальном торможении сила трения равна максимальной силе трения покоя, а она приближенно равна силе

трения скольжения. Напомним, что при движении по горизонтальной поверхности $F_{\text{тр}} = \mu mg$.

Согласно второму закону Ньютона $F = ma$, следовательно, получаем $\mu mg = ma$, откуда $a = \mu g$. Подставляя это в выражение для тормозного пути, получаем

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

Как мы видим, для решения задачи не понадобилось значение массы автомобиля, значит, это и есть лишнее данное. Однако то, что тормозной путь автомобиля не зависит от его массы, может показаться странным: ведь грузовик труднее остановить, чем легковой автомобиль!

Дело в том, что из формулы $F_{\text{тр}} = \mu mg$ следует: сила трения, действующая на автомобиль при торможении, пропорциональна его массе. Поэтому ускорение автомобиля (при том же коэффициенте трения) не зависит от его массы: грузовик и легковой автомобиль при торможении движутся с одинаковым ускорением.

Подставляя в формулу $l = \frac{v_0^2}{2\mu g}$ заданные в условии числовые значения, получаем, что тормозной путь равен 23 м.

Ответ: 23 м.

Как мы видели, тормозной путь не зависит от массы автомобиля, но зато он очень сильно зависит от его скорости! Из формулы $l = \frac{v_0^2}{2\mu g}$ следует, что при увеличении скорости автомобиля в 2 раза его тормозной путь увеличивается в 4 раза, то есть в рассмотренном случае становится равным почти 100 м! Это значит, что, проехав перекресток со скоростью 120 км/ч, водитель не сможет остановиться перед следующим перекрестком, если расстояние до него меньше 100 м. А это может привести к серьезной аварии и даже гибели людей.

5. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯГИ И СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В условиях задач о разгоне и торможении транспорта часто упоминаются *сила тяги* и *сила сопротивления*.

Что такое сила тяги, мы уже знаем (см. § 9. Третий закон Ньютона). При решении задач главное — знать, что эта сила направлена вперед. А под силой сопротивления движению понимают обычно равнодействующую *всех* сил, направленных противоположно скорости.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

За какое время автомобиль проедет 100 м, если его начальная скорость равна нулю, сила тяги 1500 Н, а силу сопротивления можно принять равной 300 Н? Масса автомобиля 1 т.

Решение. Автомобиль движется равноускоренно без начальной скорости. В таком случае время движения t можно выразить через пройденный путь l и ускорение a , воспользовавшись

формулой $l = \frac{at^2}{2}$. Мы получим $t = \sqrt{\frac{2l}{a}}$.

Следовательно, чтобы найти время движения, надо знать ускорение автомобиля. Оно обусловлено совместным действием силы тяги $\vec{F}_{\text{тяг}}$ и силы сопротивления \vec{F}_c . Поскольку эти силы направлены *противоположно*, их равнодействующая \vec{F} направлена в сторону большей силы (силы тяги) и равна по модулю *разности* модулей силы тяги и силы сопротивления:

$$F = F_{\text{тяг}} - F_c.$$

Поэтому из уравнения второго закона Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$ получаем $F_{\text{тяг}} - F_c = ma$. Отсюда

$$a = \frac{F_{\text{тяг}} - F_c}{m}.$$

Подставив числовые данные, получим $a = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Подставляя это значение в приведенное выше выражение для времени движения, получим $t = 13 \text{ с}$.

Ответ: 13 с.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Силы трения скольжения возникают между соприкасающимися телами, когда они движутся друг относительно друга. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы уменьшить скорость их относительного движения.
- Модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр. ск}} = \mu N$, где N — модуль силы нормальной реакции, μ — коэффициент трения.
- Силы трения покоя действуют между соприкасающимися телами, когда пытаются сдвинуть одно из них относительно другого. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы препятствовать их относительному движению. Максимальная сила трения покоя примерно равна силе трения скольжения.



Первый уровень

1. Когда возникает сила трения скольжения? Как она направлена?
2. Из-за чего возникает сила трения скольжения?
3. Как можно уменьшить силу трения скольжения?
4. Как зависит сила трения скольжения от силы нормальной реакции?
5. При каком условии возникает сила трения покоя? Как она направлена?
6. Брусок массой 1 кг движется равномерно по горизонтальному столу под действием горизонтально приложенной силы, равной 3 Н. Чему равен коэффициент трения между столом и бруском?
7. Шкаф пытаются сдвинуть вправо, но он остается на месте. Куда направлена действующая на шкаф сила трения покоя? Действует ли сила трения покоя на пол?

Второй уровень

8. Какая сила разгоняет автомобиль?
9. Оцените, чему равен тормозной путь автомобиля во время гололеда, если скорость автомобиля 60 км/ч.
10. Лежащий на столе брусок толкнули, и он проехал по столу до остановки 50 см. Чему равна начальная скорость бруска, если коэффициент трения между бруском и столом равен 0,4?
11. На столе лежит стопка из трех одинаковых книг массой по 400 г. Какую горизонтальную силу надо приложить, чтобы вытащить среднюю книгу, придерживая остальные? Коэффициент трения между книгами равен 0,3.
12. Брусок массой 1 кг равномерно тянут по столу с помощью пружины жесткостью 100 Н/м. Чему равен коэффициент трения между бруском и столом, если удлинение пружины равно 3 см?
13. Составьте задачу по теме «Силы трения», ответ у которой был бы: «2 м/с».



- Скорость тела изменяется только вследствие действия на него других тел.
- Первый закон Ньютона: существуют системы отсчета, называемые инерциальными, в которых тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, если на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.
- Сила — векторная величина, являющаяся мерой действия одного тела на другое.
- Все механические явления можно объяснить действием трех видов сил: сил упругости, сил тяготения и сил трения.
- Любая сила приложена к одному телу со стороны другого тела. Каждая сила характеризуется: 1) модулем, 2) направлением, 3) точкой приложения.
- Весом тела называют силу, с которой тело вследствие притяжения его Землей давит на опору или растягивает подвес. Вес покоящегося тела равен действующей на это тело силе тяжести.
- Вес свободно падающего тела равен нулю. Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют невесомостью.
- Силу, с которой опора давит на тело, называют силой нормальной реакции. Она направлена перпендикулярно поверхности опоры.
- Две силы уравнивают друг друга, когда они равны по модулю и направлены противоположно.
- Сила упругости возникает при деформации тела, то есть изменении его формы или размеров.
- Закон Гука: модуль силы упругости $F_{\text{упр}}$ прямо пропорционален удлинению пружины x . Закон Гука можно записать в виде $F_{\text{упр}} = k|x|$.
- Силу, которая производит на тело такое же действие, как несколько одновременно приложенных к этому телу сил, называют равнодействующей этих сил.

- Нахождение равнодействующей нескольких сил называют сложением этих сил. Силы складывают по правилу сложения векторов.
- Масса является мерой инертности тела.
- Отношение масс двух тел обратно отношению ускорений этих тел при их взаимодействии: $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$.
- Второй закон Ньютона: равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.
- Силу, с которой Земля притягивает тело, называют силой тяжести. Сила тяжести является частным случаем сил всемирного тяготения.
- Сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$, где m — масса тела. Благодаря тому что сила тяжести пропорциональна массе тела, массу можно измерять с помощью взвешивания.
- Скорость тела может быть направлена под любым углом к действующей на тело силе. Если скорость тела направлена так же, как сила, то тело движется прямолинейно и скорость тела увеличивается; если скорость направлена противоположно силе, тело движется прямолинейно и скорость тела уменьшается; если скорость направлена под углом к силе, тело движется криволинейно.
- Третий закон Ньютона: при любом взаимодействии тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.
- Свойства сил, с которыми тела взаимодействуют друг с другом: они всегда имеют одинаковую физическую природу и не уравнивают друг друга, поскольку приложены к разным телам.
- Закон всемирного тяготения: две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягивают друг друга силами, прямо пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Модуль каждой силы $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$. Закон всемирного тяготения открыл Ньютон.

- Коэффициент пропорциональности G называют гравитационной постоянной. Измерения показали, что $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Первым измерил гравитационную постоянную Кавендиш.
- Минимальную скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называют первой космической скоростью. Она равна примерно $8 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
- Силы трения скольжения возникают между соприкасающимися телами, когда они движутся друг относительно друга. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы уменьшить скорость относительного движения тел.
- Модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр. ск}} = \mu N$, где N — модуль силы нормальной реакции, μ — коэффициент трения.
- Силы трения покоя действуют между соприкасающимися телами, когда одно из них пытаются сдвинуть относительно другого. Направлены эти силы вдоль поверхности соприкосновения тел так, чтобы препятствовать их относительному движению.

§ 12.

ИМПУЛЬС.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

1. Импульс
2. Закон сохранения импульса
3. Реактивное движение
- 4. Неупругое столкновение движущихся тел

1. ИМПУЛЬС

В этом параграфе мы познакомимся с физической величиной, которая не изменяется (*сохраняется*) при взаимодействиях тел друг с другом. Благодаря этому в некоторых случа-

ях можно предсказать результат взаимодействия тел, не рассматривая силы, с которыми тела действуют друг на друга (например, при столкновениях тел).

Попробуем обнаружить сохраняющуюся величину в следующем опыте.



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Возьмем две одинаковые тележки, которые могут катиться по столу практически без трения. Вначале одна тележка покоится, а другая наезжает на нее, как показано на рис. 12.1, а. При столкновении тележки сцепляются и движутся затем как одно тело. Такое столкновение называют *неупругим столкновением* (или *неупругим ударом*).

Измерения показывают, что скорость *двух* сцепленных тележек *в 2 раза меньше*, чем начальная скорость одной тележки (рис. 12.1, б).

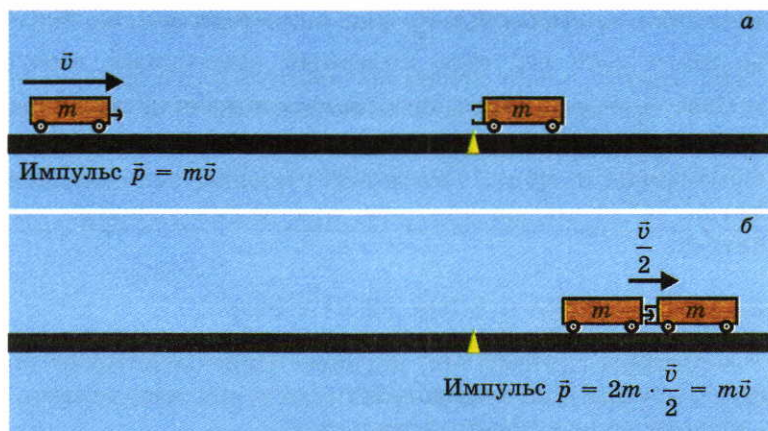


Рис. 12.1. Опыт с неупругим столкновением двух одинаковых тележек

Чтобы увидеть в нашем опыте сохраняющуюся физическую величину, заметим, что масса двух тележек *в 2 раза больше*, чем масса одной тележки. А поскольку скорость двух сцепленных тележек *в 2 раза меньше* начальной скорости одной тележки, то это означает, что *произведение массы на скорость* не изменилось.

Физическую величину \vec{p} , равную произведению массы тела m на его скорость \vec{v} , называют *импульсом тела* (или просто *импульсом*):

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Импульс — *векторная* величина. Модуль импульса $p = mv$, а направление импульса совпадает с направлением скорости тела. *Единица импульса* $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ (килограмм-метр в секунду).

? Первое тело массой 3 кг движется со скоростью 1 м/с, а второе тело массой 1 кг движется со скоростью 3 м/с в противоположном направлении. Равны ли импульсы этих тел?

В нашем опыте сохранился *суммарный* импульс тележек. Вначале импульсом обладала только движущаяся тележка: ее начальный импульс $\vec{p}_{\text{нач}} = m\vec{v}$, где m — масса тележки, \vec{v} — ее начальная скорость. После столкновения обе тележки движутся со скоростью $\frac{\vec{v}}{2}$ как одно тело массой $2m$. Импульс этого тела (то есть конечный суммарный импульс) $\vec{p}_{\text{кон}} = 2m \cdot \frac{\vec{v}}{2} = m\vec{v}$. Итак, *суммарный конечный* импульс тележек действительно равен начальному.

Суммарный импульс взаимодействующих тел сохраняется не всегда. Ниже мы рассмотрим, при каких условиях он сохраняется.

2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Рассмотрим систему тел, которые взаимодействуют *только* друг с другом и не взаимодействуют с другими телами. Такую систему тел называют *замкнутой*.

Систему взаимодействующих тел можно приближенно считать замкнутой и тогда, когда действия других тел компенсируют друг друга или пренебрежимо малы.

Например, рассмотренные выше две тележки приближенно можно считать замкнутой системой тел, потому что действующие на каждую тележку сила тяжести и сила нормальной реакции стола уравнивают друг друга, а силой трения можно пренебречь. Поэтому главной причиной изменения скоростей тележек является взаимодействие между самими тележками.

Опыты, подобные описанному выше, показывают, что векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется. Это — закон сохранения импульса.

Закон сохранения импульса можно вывести из законов Ньютона. Это будет сделано в курсе физики старших классов.

Продemonстрируем закон сохранения импульса еще на нескольких опытах.



ПОСТАВИМ ОПЫТЫ

На двух одинаковых тележках укрепим пружины, согнем их и зафиксируем в согнутом состоянии с помощью нити (рис. 12.2, а). Поставим тележки рядом и пережжем нить. Пружины распрямятся и растолкнут тележки.

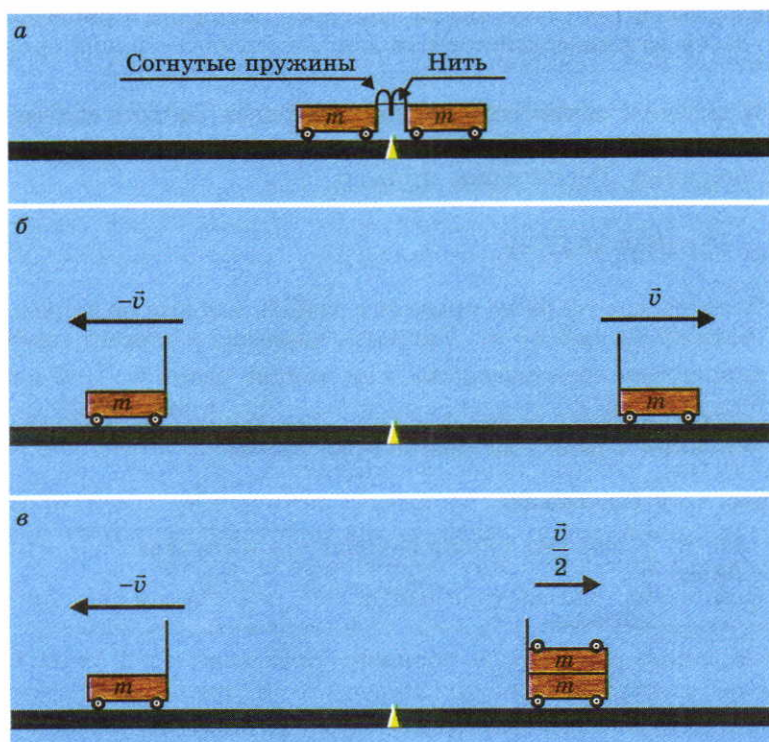


Рис. 12.2. Опыты, демонстрирующие закон сохранения импульса

Измерения показывают, что тележки равной массы приобретают при этом одинаковые по модулю и противоположно направленные скорости (рис. 12.2, б). Значит, после взаимодействия импульсы тележек \vec{p}_1 и \vec{p}_2 также равны по модулю и направлены противоположно: $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$. Следовательно, векторная сумма импульсов тележек после взаимодействия равна нулю:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0.$$

Но она была равна нулю и до взаимодействия, так как тележки покоились. Следовательно, в этом опыте закон сохранения импульса выполняется.

Повторим опыт, поместив на одну из тележек *такую же* тележку. Измерения показывают, что в этом случае груженная тележка, имеющая массу *в 2 раза больше*, приобретет *в 2 раза меньшую* скорость, чем пустая (рис. 12.2, в). Значит, и в этом случае импульсы двух тел после взаимодействия направлены противоположно и равны по модулю. Следовательно, и в этом опыте закон сохранения импульса выполняется: векторная сумма импульсов тел после взаимодействия равна векторной сумме импульсов до взаимодействия (в данном случае — равна нулю).

Используя закон сохранения импульса, можно найти конечные скорости сталкивающихся тел в случае неупругого столкновения. Рассмотрим пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Человек массой 60 кг прыгает с разбега в стоящую на рельсах тележку массой 30 кг. Скорость человека в момент прыжка направлена горизонтально, а ее модуль равен $6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. С какой скоростью будет ехать тележка с человеком? Трением между тележкой и рельсами можно пренебречь.

Дано:

$$m_1 = 60 \text{ кг}$$

$$m_2 = 30 \text{ кг}$$

$$v_1 = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

v — ?

Решение.

Согласно закону сохранения импульса

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v.$$

Отсюда

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Проверим единицы величин:

$$[v] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставим числовые значения и получим:

$$v = \frac{60 \cdot 6}{60 + 30} = 4 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Ответ: $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

3. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Вы уже знаете, что скорость тела может изменяться только в результате действия на это тело *других* тел. Например, бегун разгоняется, отталкиваясь от дороги: при этом, согласно третьему закону Ньютона, дорога толкает бегуна вперед.

А от чего же отталкивается ракета, разгоняясь в открытом космосе?

От того, что она взяла с собой в полет! Из сопла ракеты с огромной скоростью вылетают продукты сгорания топлива (раскаленные газы), приобретая импульс, направленный *назад*. При этом согласно *закону сохранения импульса* сама ракета получает импульс, направленный *вперед*. Это схематически изображено на рис. 12.3, *а*, где \vec{p}_p и \vec{p}_r — импульсы ракеты и выбрасываемых ею газов.



Рис. 12.3. Ракета: *а* — принцип действия; *б* — схема устройства

В головной части ракеты расположена кабина космонавтов и приборы (рис. 12.3, б). В начале полета на эту часть приходится всего несколько процентов от общей массы ракеты. Основная же масса ракеты в начале ее полета приходится на топливо.

Движение тела, которое возникает вследствие отделения его части с некоторой скоростью относительно тела, называют *реактивным движением*.

Таким образом, движение ракеты представляет собой пример реактивного движения.

Идею о том, что ракеты можно использовать для освоения космоса, первым высказал российский ученый и изобретатель Константин Эдуардович Циолковский (он тогда работал школьным учителем). Он писал: «Земля — колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели». Циолковский разработал и первые проекты космических ракет.

Мечту Циолковского о космических полетах первыми осуществили его соотечественники под руководством С. П. Королева. Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 года, а первый космический полет с человеком на борту состоялся 12 апреля 1961 года. Первым космонавтом Земли стал Ю. А. Гагарин.

Сегодня с помощью ракет на околоземные орбиты выводят большие космические станции, на которых постоянно работают космонавты. Запущены исследовательские ракеты на



К. Э. Циолковский
(1857—1935)

С. П. Королев
(1907—1966)

Венеру, Марс и другие планеты Солнечной системы. Россия принимает активное участие во многих международных космических проектах.

Реактивные двигатели ставят также на самолеты: самые быстрые самолеты — именно с реактивными двигателями. Автомобильные рекорды скорости тоже были поставлены на машинах с реактивными двигателями.

Интересно, что реактивное движение используется и в природе: например, кальмар движется благодаря тому, что выбрасывает струю воды.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

4. НЕУПРУГОЕ СТОЛКНОВЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ

До сих пор мы рассматривали случаи неупругого столкновения двух тел, когда одно или оба тела до взаимодействия покоились. Рассмотрим теперь случаи, когда до столкновения *оба тела движутся* вдоль одной прямой.

Обозначим массы тел m_1 и m_2 , а их скорости — соответственно \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . После столкновения тела движутся как одно тело массой $m_1 + m_2$. Обозначим скорость этого тела \vec{v} . Из закона сохранения импульса следует, что

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}.$$

Отсюда

$$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

Если сталкивающиеся тела движутся в *одном* направлении, то в числителе дроби стоит сумма *одинаково* направленных векторных величин. При нахождении модуля суммы этих величин модули их *складываются*. Рассмотрим конкретный пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Тележка массой 30 кг, движущаяся со скоростью $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, нагоняет другую тележку массой 20 кг, движущуюся со скоростью $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Тележки сцепляются. Чему равна скорость тележек после сцепки? Трением можно пренебречь.

Дано:

$$m_1 = 30 \text{ кг}$$

$$v_1 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_2 = 20 \text{ кг}$$

$$v_2 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v = ?$$

Решение.

До столкновения тележки двигались в одном направлении. Поэтому из закона сохранения импульса следует, что после столкновения скорость тележек

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Проверим единицы величин:

$$[v] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставим числовые значения:

$$v = \frac{30 \cdot 1 + 20 \cdot 0,5}{30 + 20} = 0,8 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Ответ: $0,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Рассмотрим теперь случай, когда тела до столкновения движутся *навстречу* друг другу. Тогда в числителе формулы

$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$ стоит сумма *противоположно* направленных векторных величин.

Это тоже векторная величина. Ее направление совпадает с направлением того слагаемого, модуль которого больше. Следовательно, скорость тела, образовавшаяся в результате неупругого столкновения, направлена так же, как скорость того тела, которое до столкновения имело больший по модулю импульс.

При нахождении же модуля суммы противоположно направленных векторных величин модули их *вычитаются* (см. § 1. Механическое движение. Система отсчета). Рассмотрим пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Две тележки едут навстречу друг другу. Масса красной тележки 20 кг, а масса зеленой 30 кг. Скорости тележек равны соответственно 1 и $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Тележки сцепляются. Как направлена скорость тележек после сцепки: в сторону движения красной или зеленой тележки? Чему равна эта скорость? Трением можно пренебречь.

Дано:

$$m_1 = 20 \text{ кг}$$

$$v_1 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_2 = 30 \text{ кг}$$

$$v_2 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$v = ?$

Решение.

Найдем сначала направление скорости тележек после сцепки. Модуль импульса красной тележки

$$m_1 v_1 = 20 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}},$$

а модуль импульса зеленой тележки

$$m_2 v_2 = 30 \text{ кг} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 15 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Импульс красной тележки до столкновения больше по модулю, чем импульс зеленой. Поэтому после столкновения тележки будут двигаться в сторону движения красной тележки.

Из закона сохранения импульса получаем

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Проверим единицы величин:

$$[v] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставим числовые значения:

$$v = \frac{20 \cdot 1 + 30 \cdot 0,5}{30 + 20} = 0,1 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Ответ: $0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Импульсом \vec{p} тела называют физическую величину, равную произведению массы тела m на его скорость \vec{v} . Импульс — векторная величина.
- Замкнутой системой называют систему тел, которые взаимодействуют только друг с другом и не взаимодействуют с другими телами.
- Закон сохранения импульса: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется.
- Реактивным движением называют движение тела, возникающее вследствие того, что от тела отделяется его часть с некоторой скоростью относительно тела. Примером реактивного движения является движение ракеты.

- Использовать ракеты для освоения космоса первым предложил К. Э. Циолковский.
- Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР в 1957 году. В СССР был осуществлен и первый запуск космического корабля с человеком на борту (1961 г.).



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ¹

Первый уровень

1. Что называют импульсом тела? Какая это физическая величина — скалярная или векторная?
2. По шоссе едут грузовик и легковой автомобиль. Масса грузовика в 3 раза больше массы легкового автомобиля, а скорость легкового автомобиля в 2 раза больше скорости грузовика. Чей импульс больше — грузовика или легкового автомобиля?
3. Что такое замкнутая система тел?
4. Сформулируйте закон сохранения импульса.
5. Какое взаимодействие тел называют неупругим столкновением (неупругим ударом)?
6. Тележка массой 2 кг движется со скоростью 3 м/с, наезжает на покоящуюся тележку массой 1 кг и сцепляется с ней. Какова скорость тележек после сцепки?
7. Благодаря чему разгоняется ракета в открытом космосе?
8. Какое движение называют реактивным? Приведите пример реактивного движения.
9. Кто предложил использовать ракеты для космических полетов?
10. Где и когда был запущен первый искусственный спутник Земли?
11. Почему при выстреле пушки возникает отдача (пушка откатывается назад)?

Второй уровень

12. Укрепленная на тележке пушка стреляет в горизонтальном направлении. Скорость ядра 300 м/с. Какова скорость тележки после выстрела, если масса тележки с пушкой 500 кг, а масса ядра 5 кг?

¹ В заданиях к этому параграфу предполагается, что трением можно пренебречь.

13. Пустой вагон массой 20 т наезжает на покоящийся груженный вагон массой 60 т и сцепляется с ним. После сцепки вагоны движутся со скоростью 1 м/с. Какова начальная скорость пустого вагона?
14. Тележка массой 20 кг движется со скоростью 1 м/с. Она нагоняет тележку, движущуюся со скоростью 0,5 м/с и сцепляется с ней, после чего тележки движутся со скоростью 0,7 м/с. Какова масса второй тележки?
15. Белая и синяя тележки движутся навстречу друг другу с одинаковой по модулю скоростью. Масса белой тележки в 3 раза больше массы синей. При столкновении тележки сцепляются и движутся со скоростью 0,5 м/с. Какова начальная скорость тележек?
16. Составьте задачу об импульсе, ответ у которой был бы: «Масса второй тележки 25 кг».

§ 13.

МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ

1. Механическая работа
2. Какую работу надо совершить, чтобы разогнать тело?
3. Работа различных сил
4. Мощность
- ☐ 5. Когда работа равна нулю?
- ☐ 6. Работа нескольких сил

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

В начале 19-го века на заводах и фабриках уже работали станки, по железным дорогам громыхали первые паровозы, а моря и реки бороздили первые пароходы. Все они приводились в движение *двигателями*.

Двигатель называли двигателем потому, что он всегда что-то *движет*: он прикладывает *силу*, причем точка приложения этой силы *перемещается в направлении действия силы*. Например, когда подъемный кран поднимает груз, кран прикладывает к грузу силу, точка приложения которой поднимается вместе с грузом.

Французский ученый В. Понселе предложил считать мерой действия двигателя *произведение модуля силы на модуль перемещения точки приложения силы*. Эту величину ученый назвал *механической работой*.

Механическую работу обозначают буквой *A* и для краткости часто называют просто работой. Понятие механической ра-

боты оказалось очень полезным, поэтому его распространили и на случаи, когда направление силы не совпадает с направлением перемещения точки приложения силы.

Мы ограничимся здесь случаями, когда направление силы \vec{F} совпадает с направлением перемещения \vec{s} точки приложения силы, противоположно ему или перпендикулярно. При этом механическую работу A определяют следующим образом.

- а) Если направление силы *совпадает* с направлением перемещения точки приложения силы, то работа силы

$$A = Fs.$$

В этом случае работа силы *положительна*.

- б) Если направление силы *противоположно* направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы

$$A = -Fs.$$

В этом случае работа силы *отрицательна*.

- в) Если направление силы *перпендикулярно* направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы *равна нулю*.

Ниже мы рассмотрим примеры, соответствующие каждому из этих случаев.

Обратите внимание на то, что работа — *скалярная* физическая величина.

Значение физического термина «работа» существенно отличается от значения слова «работа» в житейском смысле.

Например, когда вы думаете над трудной задачей, вы работаете головой, но *механической* работы вы при этом не совершаете. Не совершает механическую работу и человек, держащий на весу тяжелый груз (см. раздел «Развитие темы»).

Единица работы. За единицу работы приняли работу, совершаемую силой 1 Н при перемещении точки ее приложения на 1 м в направлении действия силы. Единицу работы назвали¹ *джоуль* (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Велика ли работа 1 Дж? Чтобы получить представление о единице работы, рассмотрим житейский пример.

¹ В честь английского физика Дж. Джоуля.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Какую работу совершают при равномерном подъеме на 1 м полного ведра воды массой 10 кг?

Решение. При равномерном подъеме к ведру прикладывают силу F , равную по модулю силе тяжести mg . Следовательно, для подъема ведра на высоту h совершают работу

$$A = Fh = mgh.$$

Проверив единицы величин и подставив числовые данные, получим

$$A = 10 \cdot 10 \cdot 1 = 100 \text{ (Дж)}.$$

Итак, по житейским меркам 1 Дж — небольшая работа. В современной технике используют также кратные единицы работы: килоджоуль кДж (10^3 Дж) и мегаджоуль МДж (10^6 Дж).



РЕШИМ ЗАДАЧУ

С плотины Волжской гидроэлектростанции (рис. 13.1) каждую секунду падает в среднем около 8000 м^3 воды с высоты примерно 40 м. Оцените, какую работу совершает в течение 1 с сила тяжести, действующая на падающую воду.



Рис. 13.1. Плотина Волжской ГЭС

Решение. При падении тела массой m с высоты h сила тяжести mg совершает работу $A = mgh$. Масса воды $m = \rho V$, где ρ — плотность воды ($1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$), V — объем воды, падающей в течение 1 с. Следовательно,

$$A = \rho Vgh.$$

Проверив единицы величин и подставив числовые данные, получим

$$A = 1000 \cdot 8000 \cdot 10 \cdot 40 = 3200 \cdot 10^6 \text{ (Дж)} = 3200 \text{ (МДж)}.$$

2. КАКУЮ РАБОТУ НАДО СОВЕРШИТЬ, ЧТОБЫ РАЗОГНАТЬ ТЕЛО?

Найдем работу, которую надо совершить, чтобы разогнать покоящееся вначале тело массой m до скорости, равной по модулю v .

Пусть на тело действует постоянная сила \vec{F} . Тогда работа

$$A = Fs,$$

где s — модуль перемещения.

Согласно второму закону Ньютона $F = ma$, где a — модуль ускорения тела. При движении без начальной скорости $s = \frac{v^2}{2a}$ (см. § 4. *Путь при прямолинейном равноускоренном движении*). Следовательно,

$$A = Fs = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}.$$

Запомним полученный результат: он понадобится нам в следующем параграфе.

? Какую работу надо совершить, чтобы разогнать тело массой 1 кг до скорости 10 м/с?

3. РАБОТА РАЗЛИЧНЫХ СИЛ

РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

1. Когда тело движется *вниз*, направление силы тяжести *совпадает* с направлением перемещения. Поэтому при движении тела вниз работа силы тяжести *положительна*. Если тело массой m опускается с высоты h , то работа силы тяжести

$$A = mgh.$$

2. Когда тело движется *вверх*, сила тяжести направлена *противоположно* перемещению. Поэтому при движении тела вверх работа силы тяжести *отрицательна*. При подъеме тела массой m на высоту h работа силы тяжести

$$A = -mgh.$$

? Какую работу совершает сила тяжести при падении тела массой 2 кг с высоты 20 м? при подъеме этого же тела на высоту 20 м?

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ

1. Когда деформация пружины *уменьшается* (то есть пружина возвращается в недеформированное состояние), действующая со стороны пружины сила упругости направлена так же, как перемещение, поэтому работа силы упругости *положительна*.

Обозначим модуль начальной деформации пружины x . Согласно закону Гука при уменьшении деформации пружины до нуля модуль силы упругости уменьшается от kx до нуля, поэтому среднее значение силы упругости $F_{\text{упр. ср}} = \frac{kx}{2}$. При уменьшении деформации пружины до нуля сила упругости совершает работу

$$A = F_{\text{упр. ср}} \cdot x = \frac{kx}{2} \cdot x = \frac{kx^2}{2}.$$

Это выражение тоже понадобится нам в следующем параграфе.

2. Когда мы *увеличиваем* деформацию пружины (то есть сжимаем или растягиваем ее), действующая со стороны пружины сила направлена противоположно деформации. Значит, работа силы упругости при этом *отрицательна*.

? Какую работу совершает сила упругости, когда пружина жесткостью 100 Н/м возвращается в недеформированное состояние? Начальная деформация пружины 10 см.

РАБОТА СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Сила трения скольжения направлена противоположно скорости, а значит, и перемещению тела. Поэтому *работа силы трения скольжения отрицательна*.

4. МОЩНОСТЬ

Для характеристики двигателя важна не только работа, но и «быстрота» совершения работы.

Например, подъемный кран поднимает платформу с сотнями кирпичей на высоту многоэтажного дома за 1—2 мин. А человеку, для того чтобы поднять эти же кирпичи на ту же высоту, понадобилось бы несколько дней. Говорят, что мощность подъемного крана во много раз больше мощности человека.

Мощностью N называют физическую величину, равную отношению совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена:

$$N = \frac{A}{t}.$$

Единица мощности — *ватт* (Вт) названа в честь английского изобретателя Джеймса Уатта. 1 Вт — это такая мощность, при которой работа в 1 Дж совершается за 1 с:

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Часто используют и кратные единицы мощности: киловатт (1 кВт = 10^3 Вт) и мегаватт (1 МВт = 10^6 Вт).

Чтобы получить «ощутимое» представление о единице мощности, рассмотрим пример.



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Человек равномерно поднимает за 1 с полное ведро воды массой 10 кг на высоту 1 м. Какую мощность он при этом развивает?

Решение. Совершаемая человеком работа $A = mgh$, где m — масса ведра, h — высота подъема. Следовательно,

$$N = \frac{A}{t} = \frac{mgh}{t},$$

где t — время подъема. Проверив единицы величин и подставив числовые данные, получим

$$A = \frac{10 \cdot 10 \cdot 1}{1} = 100 \text{ (Вт)}.$$

На этом примере мы видим, что человек может развивать мощность в *сотни ватт*. Сравним мощность человека с мощностью созданных им двигателей.

Где установлен двигатель	Мощность, кВт
Мотороллер	4—7
Легковой автомобиль	50—150
Грузовой автомобиль	100—1000
Тепловоз	2000—5000
Самолет	3000—100 000
Космическая ракета	более 100 000 000

Подумайте только: мощность двигателя космической ракеты превышает мощность человека в *миллиард раз*!

Мощность, сила и скорость. Мощность, развиваемую транспортным средством, часто выражают через силу и скорость. Если направление силы тяги совпадает с направлением перемещения, то развиваемая двигателем мощность

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = F \frac{s}{t} = Fv.$$

Таким образом, *мощность равна произведению модуля силы на модуль скорости.*

Формула $N = Fv$ объясняет, почему водитель производит переключение на первую скорость, когда автомобиль едет вверх по склону. Чтобы увеличить силу тяги при той же *мощности* мотора, надо уменьшить *скорость* движения.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

5. КОГДА РАБОТА РАВНА НУЛЮ?

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ РАВНО НУЛЮ

Из формулы $A = Fs$ следует, что если перемещение равно нулю, то работа равна нулю *независимо от того, насколько велика сила.*

Например, когда человек держит тяжелый груз, он не совершает механической работы. Почему же он при этом устает?

Усталость вызвана только напряжением мышц. Если положить тот же груз на пол, то он будет держать груз сколько угодно, не зная усталости.

СИЛА ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА ПЕРЕМЕЩЕНИЮ

Напомним, что если *сила перпендикулярна перемещению*, работа силы равна нулю. Например, равна нулю работа силы тяжести, когда тело движется по горизонтали (рис. 13.2).



Рис. 13.2. При движении по горизонтали сила тяжести не совершает работу

6. РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

Если на движущееся тело действует *несколько* сил, то каждая из них может совершать работу как положительную, так и отрицательную. Рассмотрим это на примерах.



РЕШИМ ЗАДАЧИ

1. Груз массой 100 кг равномерно поднимают на высоту 10 м с помощью троса. Какие силы действуют при этом на груз? Чему равна работа каждой из этих сил?

Решение. На груз действуют сила тяжести \vec{F}_t и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$. Так как груз движется равномерно, эти силы уравновешивают друг друга, то есть равны по модулю и противоположны по направлению. Каждая из них равна по модулю mg , где m — масса груза. При подъеме груза вверх на высоту h сила упругости совершает положительную работу $A_{\text{упр}} = mgh$, а сила тяжести — отрицательную работу $A_t = -mgh$. Проверив единицы величин и подставив численные данные, получим:

$$A_{\text{упр}} = 100 \cdot 10 \cdot 10 = 10^4 \text{ (Дж)},$$

$$A_t = -100 \cdot 10 \cdot 10 = -10^4 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: работа силы упругости 10 кДж, а работа силы тяжести равна -10 кДж.

2. Брусек тянут по столу с помощью горизонтально направленной нити. Какие силы действуют при этом на брусек? Чему равна работа каждой силы? Масса бруска 2 кг, пройденное им расстояние 1 м, а коэффициент трения между бруском и столом 0,5. Брусек движется равномерно.

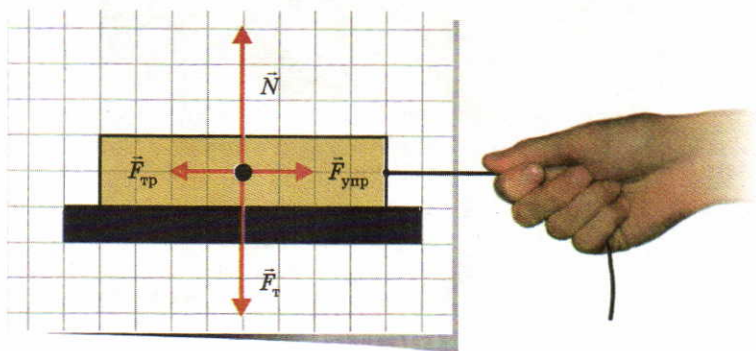


Рис. 13.3. К задаче 2

Решение. На брусок действуют сила тяжести \vec{F}_t , сила нормальной реакции \vec{N} со стороны стола, сила трения скольжения $\vec{F}_{тр}$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$ со стороны нити (рис. 13.3). Брусок движется равномерно, поэтому сила нормальной реакции уравновешивает силу тяжести, а сила трения — силу упругости со стороны нити. Отсюда

$$N = mg, F_{упр} = F_{тр} = \mu N = \mu mg.$$

При горизонтальном движении бруска работа силы тяжести и работа силы нормальной реакции равны нулю, так как эти силы направлены перпендикулярно перемещению бруска.

Работа силы упругости положительна:

$$A_{упр} = F_{упр}s = \mu mgs,$$

где s — перемещение бруска, а работа силы трения отрицательна:

$$A_{тр} = -F_{тр}s = -\mu mgs.$$

Проверив единицы величин и подставив числовые данные, получим:

$$A_{упр} = 0,5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 1 = 10 \text{ (Дж)},$$

$$A_{тр} = -0,5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 1 = -10 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: работа силы упругости 10 Дж, работа силы трения равна -10 Дж, работа силы тяжести и силы нормальной реакции равна нулю.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Если направление силы совпадает с направлением перемещения точки приложения силы, то работа силы $A = Fs$. В этом случае работа силы положительна.
- Если направление силы противоположно направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы $A = -Fs$. В этом случае работа силы отрицательна.
- Если направление силы перпендикулярно направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы равна нулю.
- Работа — скалярная физическая величина.
- Единица работы — джоуль (Дж); $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.
- Чтобы разогнать покоящееся вначале тело, надо совершить работу $A = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса тела, v — модуль конечной скорости тела.

- Работа силы тяжести при движении тела вниз: $A = mgh$, где m — масса тела, h — начальная высота тела.
- Работа силы упругости при уменьшении деформации пружины до нуля: $A = \frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины, x — начальная деформация пружины.
- Работа силы трения скольжения отрицательна.
- Мощностью N называют физическую величину, равную отношению совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена: $N = \frac{A}{t}$.
- Единица мощности — ватт (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.
- Мощность транспортного средства можно выразить через силу тяги и скорость: $N = Fv$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Чему равна работа силы, когда направление силы совпадает с направлением перемещения?
2. Чему равна работа силы тяжести при движении тела вверх? вниз?
3. Вверх или вниз направлено перемещение тела, если работа силы тяжести положительна?
4. Чему равна работа силы, когда направление силы перпендикулярно направлению перемещения?
5. Приведите пример, когда работа силы отрицательна.
6. Приведите пример, когда работа силы равна нулю, хотя перемещение не равно нулю.
7. Подъемный кран равномерно поднимает на тросе бетонный блок массой 1 т на высоту 20 м. Какую работу совершает при этом сила упругости?
8. Могут ли действующие на движущееся тело силы совершать одна положительную работу, а другая — отрицательную? Приведите пример, иллюстрирующий ваш ответ.
9. Что такое мощность?

10. Школьник массой 60 кг поднимается с первого на пятый этаж за 2 мин. Какую мощность при этом он развивает? Высота одного этажа 3 м.
11. Автомобиль едет с постоянной скоростью 20 м/с, при этом двигатель развивает мощность 100 кВт. Какова сила тяги автомобиля?

Второй уровень

12. В каких случаях механическая работа равна нулю? Приведите примеры, иллюстрирующие ваш ответ.
13. При равномерном подъеме платформы с грузом подъемный кран совершил работу 1000 Дж, а при спуске пустой платформы сила тяжести совершила работу 200 Дж. Во сколько раз масса груза больше массы пустой платформы?
14. Каков знак работы силы упругости при сжатии недеформированной пружины? при растяжении?
15. В каком случае работа силы упругости положительна?
16. Каков знак работы силы трения скольжения? Обоснуйте ваш ответ.
17. Чтобы растянуть пружину на 5 см, надо совершить работу 20 Дж. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть эту же пружину еще на 5 см?
18. Эскалатор метро за 2 мин поднимает 200 пассажиров на высоту 30 м. Какова мощность двигателя эскалатора? Примите массу одного пассажира равной 70 кг.
19. Составьте задачу о работе силы, ответ у которой был бы: «1,2 кДж».

§ 14. ЭНЕРГИЯ

1. Механическая энергия
2. Когда механическая энергия сохраняется?
- 3. Пример решения более трудной задачи
- 4. Закон сохранения энергии

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

До сих пор мы говорили о работе *силы*. Поскольку любая сила действует со стороны некоторого *тела*, работу силы часто называют *работой тела*, со стороны которого приложена сила.

Например, когда говорят о работе, совершаемой деформированной пружиной при уменьшении деформации, то имеют

в виду работу, которую совершает сила упругости, действующая со стороны пружины.

Движущееся тело тоже может совершить работу. Например, если движущаяся по столу тележка наезжает на пружину и деформирует ее, то работу по сжатию пружины совершает сила, действующая со стороны тележки. При этом скорость тележки уменьшается.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Поднятое над Землей тело совершает работу, когда оно движется вниз. Вспомните, например, какую большую работу совершает поднятая плотиной вода, когда она падает на лопасти турбин на гидроэлектростанции. При этом изменяется взаимное положение *действующих друг на друга* тела и Земли.

Когда работу совершает деформированная пружина, изменяется взаимное положение *действующих друг на друга* частей, из которых состоит пружина.

Физическую величину, характеризующую способность системы взаимодействующих тел (частей тела) совершить работу вследствие изменения их взаимного положения, называют *потенциальной энергией*.

Рассмотрим примеры.

Потенциальная энергия поднятого груза. В предыдущем параграфе мы показали, что когда груз массой m опускается с высоты h , сила тяжести совершает работу $A = mgh$. Значит, если нулевому значению потенциальной энергии сопоставить положение груза на поверхности Земли, то

потенциальная энергия поднятого груза $E_p = mgh$.

? Какова потенциальная энергия груза массой 10 кг, поднятого на высоту 20 м?

Потенциальная энергия деформированной пружины. В предыдущем параграфе мы показали, что когда деформация пружины уменьшается от начального значения x до нуля, сила упругости совершает работу

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

где k — жесткость пружины. Следовательно,

потенциальная энергия деформированной пружины

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

? Во сколько раз увеличится потенциальная энергия пружины, если деформацию пружины увеличить в 3 раза?

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Как мы уже говорили, движущееся тело может совершить работу при уменьшении скорости.

Физическую величину, равную работе, которую совершает движущееся тело при уменьшении его скорости до полной остановки, называют *кинетической энергией* тела.

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна работе, которую надо совершить, чтобы сообщить телу данную скорость. В предыдущем параграфе мы показали, что она равна $\frac{mv^2}{2}$. Следовательно,

кинетическая энергия

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

где m — масса тела, v — модуль скорости тела.

? По шоссе едут два автомобиля равной массы. Скорость первого автомобиля в 2 раза больше скорости второго. Во сколько раз кинетическая энергия первого автомобиля больше?

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

При падении тела его скорость увеличивается. Поскольку кинетическая энергия тела $E_k = \frac{mv^2}{2}$, то *при падении тела его кинетическая энергия увеличивается.*

Но при падении тела уменьшается его высота над поверхностью Земли. Так как потенциальная энергия тела $E_p = mgh$, то *при падении тела его потенциальная энергия уменьшается.*

На этом примере мы видим, что потенциальная энергия может превращаться в кинетическую. Возможно и обратное превращение: при подъеме брошенного вверх тела его кинетическая энергия превращается в потенциальную.

Итак, в механических явлениях потенциальная энергия может превращаться в кинетическую и обратно. Поэтому

сумму потенциальной и кинетической энергии называют *механической энергией*.

Единица энергии. Изменение энергии тела или системы взаимодействующих тел численно равно совершенной ими работе. Поэтому единица энергии совпадает с единицей работы, то есть *единицей энергии является 1 джоуль (1 Дж)*.

2. КОГДА МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ СОХРАНЯЕТСЯ?

Как мы видели, при падении тела его кинетическая энергия увеличивается, а потенциальная — уменьшается. Докажем, что при *свободном* падении *сумма* этих энергий остается *постоянной*.

Пусть тело массой m падает с высоты H . Начальная потенциальная энергия тела равна mgH , а начальная кинетическая энергия равна нулю. Следовательно, полная начальная механическая энергия тела (равная сумме потенциальной и кинетической энергии) $E_{\text{нач}} = mgH$.

Найдем кинетическую и потенциальную энергии падающего тела через промежутки времени t .

При свободном падении скорость $v = gt$, поэтому кинетическая энергия

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}.$$

За время t тело пролетело путь, равный $\frac{gt^2}{2}$, поэтому потенциальная энергия тела стала равной

$$E_p = mg\left(H - \frac{gt^2}{2}\right) = mgH - \frac{mg^2t^2}{2}.$$

Следовательно, в момент времени t механическая энергия

$$E = E_k + E_p = \frac{mg^2t^2}{2} + \left(mgH - \frac{mg^2t^2}{2}\right) = mgH = E_{\text{нач}}.$$

Итак, мы видим, что в процессе падения механическая энергия свободно падающего тела остается равной начальной механической энергии, то есть остается постоянной (сохраняется).

Этот и другие многочисленные примеры показывают, что если можно пренебречь трением, то есть если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется.

Это утверждение называют *законом сохранения механической энергии*.

Заметим, что при неупругих столкновениях механическая энергия не сохраняется. Например, если две тележки с одинаковой массой, движущиеся навстречу друг другу с одинаковой по модулю скоростью, сталкиваются, то после неупругого столкновения они остановятся. При этом их кинетическая энергия станет равной нулю, хотя начальная кинетическая энергия не была равна нулю.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ БОЛЕЕ ТРУДНОЙ ЗАДАЧИ

Груз массой 10 кг подняли с помощью троса на 20 м, прикладывая к нему силу 150 Н. Чему равна работа этой силы? работа силы тяжести? потенциальная энергия груза? кинетическая энергия? В начальный момент груз покоился.

Решение. Обозначим массу груза m , а высоту подъема h . На движущийся груз действуют направленная вверх сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ со стороны троса и направленная вниз сила тяжести \vec{F}_T . Равнодействующая этих противоположно направленных сил не равна нулю, потому что они не равны по модулю: сила тяжести $mg = 100$ Н, а $F_{\text{упр}} = 150$ Н. Значит, груз поднимается с ускорением.

Итак, в данном случае при подъеме груза увеличивается как его потенциальная энергия (поскольку увеличивается высота над Землей), так и кинетическая (поскольку увеличивается скорость).

Работа силы упругости положительна:

$$A_{\text{упр}} = F_{\text{упр}} h = 150 \text{ Н} \cdot 20 \text{ м} = 3000 \text{ Дж}.$$

Работа силы тяжести отрицательна:

$$A_T = -F_T h = -mgh = -10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 20 \text{ м} = -2000 \text{ Дж}.$$

Потенциальная энергия груза стала равной $E_p = mgh = 2000$ Дж. Чтобы узнать его кинетическую энергию, найдем, какой стала скорость груза. Равнодействующая F силы упругости и силы тяжести

равна по модулю $F_{\text{упр}} - F_{\text{т}} = 200 \text{ Н}$. Значит, согласно второму закону Ньютона груз поднимается с ускорением

$$a = \frac{F}{m} = \frac{F_{\text{упр}} - F_{\text{т}}}{m} = \frac{50 \text{ Н}}{10 \text{ кг}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

При равноускоренном движении без начальной скорости $v^2 = 2ah$ (см. § 4. *Путь при прямолинейном равноускоренном движении*), поэтому

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = m ah = 10 \text{ кг} \cdot 5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 20 \text{ м} = 1000 \text{ Дж}.$$

Ответ: работа силы упругости 3 кДж; работа силы тяжести равна -2 кДж; потенциальная энергия 2 кДж; кинетическая энергия 1 кДж.

Обратите внимание: работа силы упругости равна сумме потенциальной и кинетической энергии груза.

4. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Вследствие трения *механическая* энергия тела или системы тел всегда *уменьшается*, а *внутренняя* энергия *увеличивается*, потому что тела нагреваются.

Кроме механической и внутренней, существуют и другие виды энергии, например электрическая и ядерная.

В 40-х годах 19-го века трое ученых — Роберт Майер, Герман Гельмгольц и Джеймс Джоуль — независимо друг от друга высказали предположение, что суммарная энергия *всегда* сохраняется, то есть сформулировали

закон сохранения энергии: энергия не возникает и не исчезает, а может только превращаться из одного вида в другой, а также переходить от одного тела к другому.

Закон сохранения энергии многократно проверялся в самых различных опытах и всегда выдерживал проверку. Сегодня его считают одним из важнейших законов природы, потому что он *связывает воедино все явления природы*.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Физическую величину, характеризующую способность системы взаимодействующих тел (частей тела) совершить работу вследствие изменения их взаимного положения, называют потенциальной энергией.

- Потенциальная энергия поднятого груза $E_p = mgh$, где m — масса груза, h — высота, на которую поднят груз.
- Потенциальная энергия деформированной пружины $E_p = \frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины, x — деформация пружины.
- Физическую величину, равную работе, которую совершает движущееся тело при уменьшении его скорости до полной остановки, называют кинетической энергией тела.
- Кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса тела, v — модуль скорости тела.
- Механической энергией называют сумму потенциальной и кинетической энергии.
- Единица энергии — джоуль (Дж).
- Закон сохранения механической энергии: если можно пренебречь трением, то есть если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется.
- Закон сохранения энергии: энергия не возникает и не исчезает, а может только превращаться из одного вида в другой, а также переходить от одного тела к другому.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Что такое потенциальная энергия?
2. Чему равна потенциальная энергия поднятого груза?
3. Какой потенциальной энергией обладает груз массой 20 кг, поднятый на высоту 10 м?
4. Чему равна потенциальная энергия деформированной пружины?
5. Чему равна кинетическая энергия тела?
6. Во сколько раз увеличивается кинетическая энергия тела, когда его скорость увеличивается в 3 раза?
7. По шоссе едут грузовик и легковой автомобиль. Масса грузовика 4 т, а масса легкового автомобиля 1 т. С какой скоростью едет грузовик, если кинетическая энергия автомобилей одинакова, а скорость легкового автомобиля 100 км/ч?

8. Что такое механическая энергия? Какова единица энергии?
9. При каком условии сохраняется механическая энергия?
10. С крыши падает сосулька. Как изменяется при падении ее кинетическая энергия? потенциальная? механическая? Примите, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.
11. Какие превращения энергии происходят при движении камня, брошенного вверх? Примите, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.

Второй уровень

12. Плот плывет по течению реки с постоянной скоростью. Как изменяется со временем потенциальная энергия плота? кинетическая?
13. Потенциальная энергия растянутой на 10 см пружины 100 Н. Какова жесткость пружины?
14. Если растянуть пружину на 1 см, ее потенциальная энергия будет равна 10 Дж. Какой станет потенциальная энергия этой же пружины, если ее растянуть еще на 2 см?
15. Какие превращения энергии происходят при наличии трения?
16. Груз падает с высоты 5 м. В конце падения его скорость равна 8 м/с. Какая часть начальной потенциальной энергии груза перешла во внутреннюю энергию?
17. Мальчик на санях спускается с горки высотой 20 м. Чему была бы равна скорость саней в конце спуска, если бы механическая энергия во время спуска сохранялась? Сравните эту скорость со скоростью автомобиля, движущегося со скоростью 60 км/ч.
18. Составьте задачу об энергии, ответ у которой был бы: «На 2 м».



ГЛАВНОЕ В § 12–14

- Импульсом \vec{p} тела называют физическую величину, равную произведению массы тела m на его скорость \vec{v} . Импульс — векторная величина.
- Замкнутой системой называют систему тел, которые взаимодействуют только друг с другом и не взаимодействуют с другими телами.

- Закон сохранения импульса: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется.
- Реактивным движением называют движение тела, которое возникает вследствие того, что от тела отделяется его часть с некоторой скоростью относительно тела. Примером реактивного движения является движение ракеты.
- Использовать ракеты для освоения космоса первым предложил К. Э. Циолковский. Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР в 1957 году. В СССР был осуществлен и первый запуск космического корабля с человеком на борту (1961 г.).
- Если направление силы совпадает с направлением перемещения точки приложения силы, то работа силы $A = Fs$. В этом случае работа силы положительна.
- Если направление силы противоположно направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы $A = -Fs$. В этом случае работа силы отрицательна.
- Если направление силы перпендикулярно направлению перемещения точки приложения силы, то работа силы равна нулю.
- Работа — скалярная физическая величина.
- Единица работы — джоуль (Дж); $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.
- Мощностью N называют физическую величину, равную отношению совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена: $N = \frac{A}{t}$.
- Единица мощности — ватт (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.
- Мощность транспортного средства можно выразить через силу тяги и скорость: $N = Fv$.
- Физическую величину, характеризующую способность системы взаимодействующих тел (частей тела) совершить работу вследствие изменения их взаимного положения, называют потенциальной энергией.
- Потенциальная энергия поднятого груза $E_p = mgh$, где m — масса груза, h — высота, на которую поднят груз.

- Потенциальная энергия деформированной пружины $E_p = \frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины, x — деформация пружины.
- Физическую величину, равную работе, которую совершает движущееся тело при уменьшении его скорости до полной остановки тела, называют кинетической энергией тела.
- Кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса тела, v — модуль скорости тела.
- Механической энергией называют сумму потенциальной и кинетической энергии.
- Единица энергии — джоуль (Дж).
- Закон сохранения механической энергии: если можно пренебречь трением, то есть если между телами системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется.
- Закон сохранения энергии: энергия не возникает и не исчезает, а может только превращаться из одного вида в другой, а также переходить от одного тела к другому.

§ 15.

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1. Примеры механических колебаний
2. Амплитуда, период и частота колебаний
3. Гармонические колебания
4. Превращения энергии при колебаниях
- 5. Период колебаний нитяного маятника
- 6. Период колебаний пружинного маятника

1. ПРИМЕРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ



ПОСТАВИМ ОПЫТЫ

Возьмем нитяной маятник — груз, подвешенный на нити. Моделью такого маятника является *математический маятник*, для которого размерами груза и массой нити можно пренебречь, а нить считать нерастяжимой.

Отклоним груз на нити (рис. 15.1, а) и отпустим. Груз начнет двигаться, возвращаясь в положение равновесия (когда нить вертикальна). Достигнув этого положения (рис. 15.1, б), груз по инерции пройдет его и начнет отклоняться в противоположную сторону.

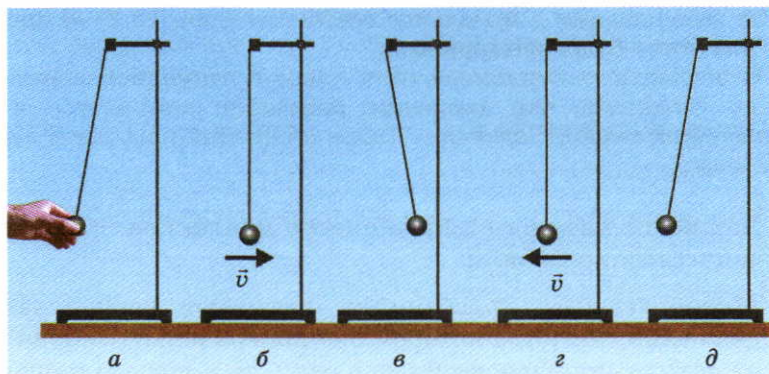


Рис. 15.1. Движение нитяного маятника в течение одного периода колебаний

Достигнув максимального отклонения (рис. 15.1, в), груз начнет двигаться в обратном направлении (рис. 15.1, г) и вернется в начальное состояние (рис. 15.1, д). После этого движение маятника будет повторяться.

Возьмем теперь *пружинный маятник* — груз, подвешенный на пружине. Как мы сейчас увидим, у пружинного маятника много общего с нитяным.

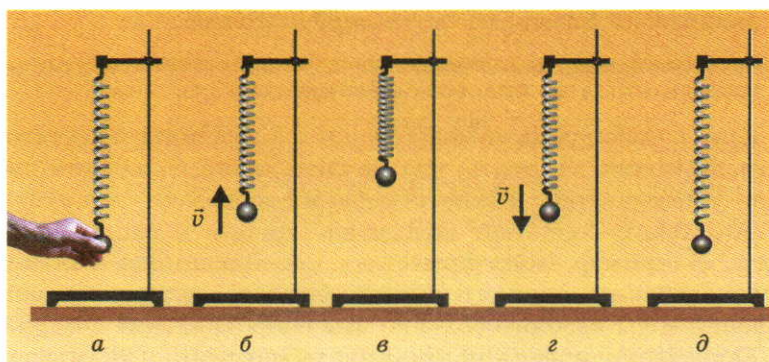


Рис. 15.2. Движение пружинного маятника в течение одного периода колебаний

Отклоним теперь этот груз от положения равновесия по вертикали (рис. 15.2, а). Он начнет возвращаться в положение равновесия, по инерции пройдет его (рис. 15.2, б) и будет отклоняться в противоположную сторону. Так же, как и в случае нитяного маятника, достигнув максимального отклонения (рис. 15.2, в), груз начнет движение в обратном направлении (рис. 15.2, г). После возвращения в начальное состояние (рис. 15.2, д) движение маятника будет повторяться.

С помощью секундомера (или часов с секундной стрелкой) можно убедиться, что движение маятника повторяется через *равные промежутки времени*. Такое движение называют *периодическим*.

Движение нитяного и пружинного маятников — примеры механических колебаний.

Механическими колебаниями называют периодическое движение тела, при котором оно попеременно отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону.

Механические колебания — один из наиболее распространенных видов движения в природе и технике.

? Приведите известные вам примеры механических колебаний в природе и технике.

2. АМПЛИТУДА, ПЕРИОД И ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ

При колебаниях отклонение тела от положения равновесия изменяется от нуля до некоторого наибольшего значения.

Наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия называют *амплитудой колебаний*.

? Пружинный маятник совершил одно полное колебание. Чему равен пройденный грузом путь, если амплитуда колебаний 2 см?

Если понаблюдать за колеблющимся маятником достаточно долго, то можно заметить, что амплитуда его колебаний постепенно уменьшается. Такие колебания называют *затухающими*. Колебания затухают вследствие трения и сопротивления среды. Например, если поместить колеблющийся маятник в воду, колебания затухнут намного быстрее, потому что сопротивление воды намного больше, чем сопротивление воздуха.

Если периодически подталкивать маятник, амплитуда его колебаний будет оставаться неизменной. Такие колебания называют *незатухающими*. Для маятниковых часов изобрели

специальное устройство, с помощью которого маятник сам управляет этими «подталкиваниями», поэтому колебания маятника часов являются незатухающими.

Промежуток времени T , в течение которого происходит одно полное колебание, называют *периодом колебаний*.

Полное колебание совершается, например, за время, когда тело из одного крайнего положения возвращается в *это же* крайнее положение.

Частотой колебаний ν называют физическую величину, равную числу колебаний за единицу времени.

Период и частота связаны соотношением

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

Это соотношение выводится точно так же, как и для движения по окружности (см. § 5. *Равномерное движение по окружности*).

Единицу частоты колебаний называют *герц* (Гц):

$$1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}}.$$

При частоте 1 Гц тело совершает одно колебание в секунду, а при частоте 1000 Гц (1 кГц) тело совершает 1000 колебаний в секунду.

? Маятник за 10 с совершил 40 полных колебаний. Каковы период и частота колебаний?



РЕШИМ ЗАДАЧУ

Качели за 1 с прошли из крайнего левого положения (рис. 15.3, а) в крайнее правое (рис. 15.3, б). Чему равны период и частота колебаний качелей?

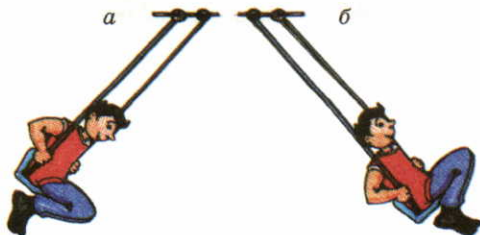


Рис. 15.3. Какой части периода соответствует это движение качелей?

Решение. Из крайнего левого положения в крайнее правое качели проходят за половину периода колебаний, потому что за весь период они проходят из крайнего левого положения в крайнее правое и *возвращаются обратно*. Значит, в данном случае период колебаний равен 2 с. При этом частота колебаний равна 0,5 Гц.

Ответ: 2 с; 0,5 Гц.

3. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Возьмем в качестве груза для маятника небольшой сосуд в форме перевернутого конуса с малым отверстием в вершине. Насыплем в сосуд мелкий сухой песок. При колебаниях маятника высыпавшийся тонкой струйкой песок будет «рисовать» на равномерно движущемся листе картона график зависимости смещения груза от времени (рис. 15.4). Этот волнообразный график называют *синусоидой*.

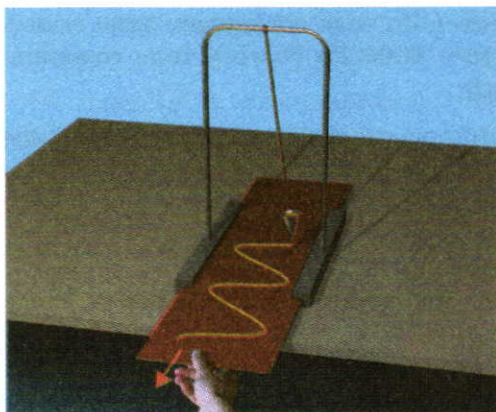


Рис. 15.4. Запись графика колебаний

Колебания, при которых смещение тела от положения равновесия изменяется по закону синуса (или косинуса) называют *гармоническими*.

На рис. 15.5 приведены графики зависимости смещения двух гармонически колеблющихся тел от времени. Амплитуда

колебаний тела, график которого изображен красной линией, равна 10 см, а период колебаний 1 с.

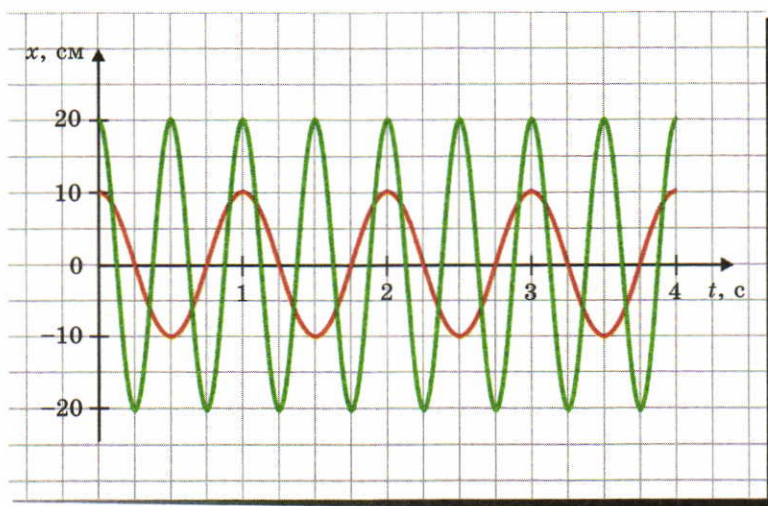


Рис. 15.5. Графики гармонических колебаний

? Чему равны амплитуда, период и частота колебаний тела, график колебаний которого изображен на рис. 15.5 зеленой линией?

Примерами гармонических колебаний являются малые колебания нитяного маятника и колебания пружинного маятника (если для силы упругости выполняется закон Гука).

4. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

При колебаниях скорость тела и его положение периодически изменяются. Значит, изменяются кинетическая и потенциальная энергии груза.

Рассмотрим эти изменения на примере нитяного маятника.

Отклоним груз на нити в сторону и отпустим. В начальный момент скорость груза, а следовательно, и его кинетическая энергия равны нулю. Потенциальная же энергия в начальном положении максимальна, потому что груз находится на максимальной высоте (при данной амплитуде колебаний).

Когда груз движется к положению равновесия, его скорость увеличивается, а тем самым увеличивается и его кинетическая энергия. Потенциальная же энергия груза уменьшается, потому что уменьшается высота, на которой он находится.

Когда груз проходит положение равновесия, скорость груза и, следовательно, его кинетическая энергия максимальны, а высота груза и, следовательно, его потенциальная энергия — минимальны.

Если можно пренебречь трением, механическая энергия, то есть сумма потенциальной и кинетической энергии, сохраняется. Таким образом, при колебаниях происходят *периодические превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно*.

Именно «избыток» энергии (по сравнению с ее значением в положении равновесия, когда тело покоится) и «заставляет» тело совершать колебания вновь и вновь. Вследствие закона сохранения энергии тело просто не может остановиться в положении равновесия!

При отсутствии трения колебания были бы незатухающими. При наличии же трения механическая энергия не сохраняется: как вы уже знаете, она превращается во внутреннюю энергию. Поэтому при наличии трения колебания затухают.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

5. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ НИТЯНОГО МАЯТНИКА



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Будем изменять амплитуду колебаний нитяного маятника, отводя его вначале на большее или меньшее расстояние от положения равновесия.

Измеряя период колебаний при разных амплитудах, можно заметить, что для *малых колебаний* (когда амплитуда колебаний намного меньше длины нити) *период колебаний практически не зависит от их амплитуды*.

Это замечательное свойство колебаний маятника открыл 19-летний Галилей, наблюдая за колебаниями подвешенных в соборе светильников (рис. 15.6). Время он измерял по собственному пульсу, потому что о наручных часах никто тогда и не мечтал.

Первые *маятниковые* часы сконструировал голландский ученый Христиан Гюйгенс, используя открытие Галилея. Маятниковые часы в течение нескольких веков были самыми

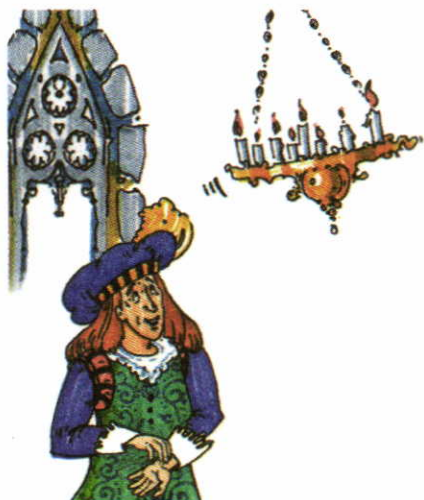


Рис. 15.6. Юный Галилей делает свое первое открытие

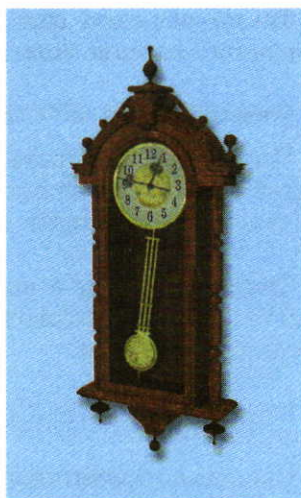


Рис. 15.7. Маятниковые часы

точными. Их и сегодня можно увидеть в некоторых домах (рис. 15.7).



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Измеряя период колебаний маятника при разных массах груза, можно обнаружить, что *период колебаний маятника не зависит от массы груза*.

А вот от *длины нити* период колебаний нитяного маятника зависит. Проведя измерения, мы обнаружим, что *с увеличением длины нити период колебаний увеличивается*.

При увеличении длины нити в 4 раза период колебаний увеличивается в 2 раза, а при увеличении длины нити в 9 раз период колебаний увеличивается в 3 раза. Это позволяет предположить, что *период колебаний математического маятника пропорционален корню квадратному из длины нити*.

Расчеты и опыты показывают, что период колебаний математического маятника

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

где l — длина нити, g — модуль ускорения свободного падения.

Таким образом, для малых колебаний нитяного маятника период зависит только от длины нити.

САМОДЕЛЬНЫЙ СЕКУНДОМЕР

Проверьте на опыте, что период колебаний маятника с длиной нити 1 м с большой точностью равен 2 с. Значит, такой маятник проходит положение равновесия с интервалом 1 с.

Таким образом, с помощью нити, линейки и груза вы можете смастерить довольно точный секундомер буквально за считанные секунды.

6. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Свойства пружинного маятника отличаются от свойств математического маятника, но одно важное свойство оказывается для них общим. Какое же это свойство?



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Измеряя период колебаний пружинного маятника при разных амплитудах, можно заметить, что, так же как и для математического маятника, *период колебаний практически не зависит от их амплитуды.*

Это и есть *общее* свойство пружинного и математического маятников. И как вы, наверное, уже догадались, его также использовали для конструирования часов — на этот раз *пружинных*. В отличие от маятниковых, пружинные часы можно сделать настолько малыми, что их можно носить на руке.



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Измеряя период колебаний маятника при разных массах груза, можно обнаружить, что чем больше масса груза, тем больше период колебаний.

При увеличении массы в 4 раза период колебаний увеличивается в 2 раза, а при увеличении массы в 9 раз период колебаний увеличивается в 3 раза. Это позволяет предположить, что *период колебаний пружинного маятника пропорционален корню квадратному из массы груза.*

Кроме того, период колебаний пружинного маятника зависит также от свойств пружины: чем она жестче, то есть чем больше сила упругости при той же деформации пружины, тем меньше период колебаний.

Расчеты и опыты показывают, что период колебаний пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m — масса груза, k — жесткость пружины.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Механическими колебаниями называют периодическое движение тела, при котором оно попеременно отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону.
- Амплитудой колебаний называют наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия.
- Периодом колебаний называют промежуток времени T , в течение которого происходит одно полное колебание.
- Частотой колебаний ν называют физическую величину, равную числу колебаний за единицу времени. Единица частоты колебаний — герц (Гц): $1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}}$.
- Период и частота связаны соотношением $\nu = \frac{1}{T}$.
- Колебания, при которых смещение тела от положения равновесия изменяется по закону синуса (или косинуса), называют гармоническими.
- При колебаниях происходят периодические превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно.
- Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити, g — модуль ускорения свободного падения.
- Период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, где m — масса груза, k — жесткость пружины.



Первый уровень

1. Что такое механические колебания? Приведите примеры механических колебаний.
2. Что такое период и частота колебания? Как они связаны друг с другом?
3. Тело за 20 с совершило 100 колебаний. Чему равны период и частота колебаний?
4. Сколько раз в течение одного периода маятник проходит положение равновесия?
5. Период колебаний маятника 3 с. Через какие промежутки времени он проходит положение равновесия?
6. После того как качели отклонили, они первый раз прошли положение равновесия через 1 с. Какова частота колебаний качелей?
7. Какие превращения энергии происходят при незатухающих колебаниях? при затухающих?
8. На рис. 15.8 изображены графики зависимости смещения от времени для двух колеблющихся тел — 1 и 2. Чему равны амплитуды, периоды и частоты колебаний этих тел?

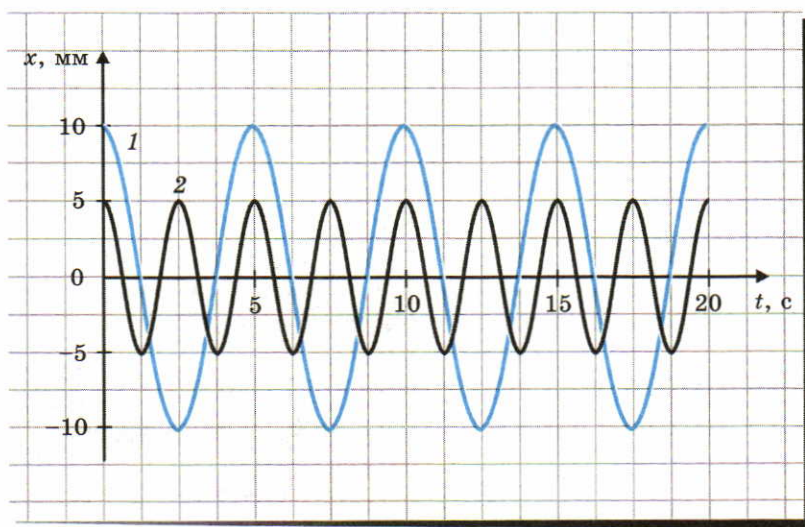


Рис. 15.8. К заданию 8

Второй уровень

9. Одно колеблющееся тело за 20 с совершило 80 колебаний, а другое — 300 колебаний за 1 мин. Период колебаний какого тела больше? во сколько раз больше?
10. Пружинный маятник колеблется с частотой 10 Гц. Какой путь проходит груз за 1 мин, если амплитуда колебаний 5 см?
11. Каковы основные свойства математического маятника? Где их используют?
12. Каковы основные свойства пружинного маятника? Где их используют? Что общего у пружинного и математического маятников?
13. Каков период колебаний маятника с длиной нити 25 см? Для ответа на этот вопрос найдите в тексте, чему равен период колебаний маятника с длиной нити 1 м, и учтите, как зависит период колебаний от длины нити. Проверьте свой расчет на опыте.
14. Амплитуда колебаний пружинного маятника 8 см. При каком смещении от положения равновесия кинетическая энергия маятника в 3 раза больше потенциальной?
15. Составьте задачу о колебаниях, ответ у которой был бы: «Только для нитяного маятника».

§ 16.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

1. Виды механических волн
2. Основные характеристики волн

1. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Понаблюдайте за волнами на воде (рис. 16.1). Вы увидите, что они движутся. Но это движение отличается от уже знакомого нам движения тел. Особенно заметным станет это различие, если понаблюдать за движением щепки, плавающей на поверхности воды. Щепка только поднимается и опускается, не следуя за



Рис. 16.1. Волны на воде — наглядный пример механических волн

бегущей волной, а оставаясь примерно на одном и том же месте: волна как бы проходит под щепкой.

Что же тогда движется в волне и почему волна «бежит»? В поисках ответов на эти вопросы начнем с опытов.



ПОСТАВИМ ОПЫТЫ

Если один конец пружины двигать вдоль пружины, совершая рукой колебания, то вдоль пружины побежит волна, состоящая из чередующихся разрежений и сжатий (рис. 16.2, а). Распространение волны обусловлено *взаимодействием частиц*, из которых состоит пружина. В этом опыте частицы пружины колеблются, смещаясь при этом *вдоль* направления распространения волны.

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют *продольными*.

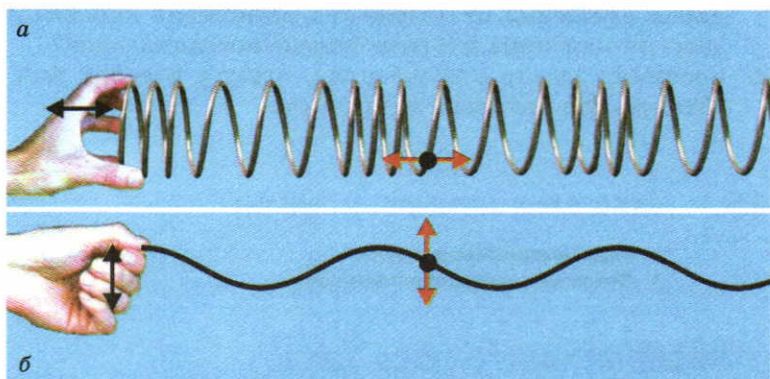


Рис. 16.2. Продольные (а) и поперечные (б) волны

Рассмотрим теперь другой вид волн. Возьмем шнур и начнем совершать колебания рукой в направлении, перпендикулярном шнуру. Мы увидим, что и в этом случае вдоль шнура побежит волна. Движение волны обусловлено *взаимодействием частиц*, из которых состоит шнур. Однако частицы шнура движутся в направлении, *перпендикулярном* направлению распространения волны (рис. 16.2, б).

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются поперек распространения волны, называют *поперечными*.

Итак, механические волны обусловлены движением частиц среды, а их распространение объясняется тем, что частицы среды взаимодействуют друг с другом.

Где распространяются продольные волны? Продольные волны представляют собой чередующиеся в пространстве и времени разрежения и сжатия. При разрежениях и сжатиях изменяются силы давления, которые существуют *во всех средах*: твердых, жидких и газообразных. Поэтому *продольные волны могут распространяться в любой среде*.

Где распространяются поперечные волны? Для возникновения поперечных волн необходимо, чтобы между частицами вещества существовали силы, препятствующие изменению формы тела. Такие силы существуют только в твердых телах. Поэтому *поперечные волны могут распространяться только в твердых телах*¹.



Какие волны могут распространяться в воздухе — продольные или поперечные?

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН

Если волна создается колеблющимся в среде телом, то при распространении волны каждая точка среды совершает колебания с одной и той же частотой.

Частоту ν колебаний каждой точки среды называют *частотой волны*. Она равна частоте колебаний тела — источника волн.

Величину T , обратную частоте, называют *периодом волны*:

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

Это период колебаний каждой точки среды. Он совпадает с периодом колебаний тела — источника волн.

Амплитуду колебаний частиц среды, то есть модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия, называют *амплитудой волны*.

¹ Иногда в качестве примера поперечных волн приводят волны на поверхности воды, однако это не совсем точно. Исследования показывают, что при распространении таких волн частицы воды вблизи поверхности движутся по окружностям. Подробное рассмотрение волн на воде выходит за рамки нашего курса.

Максимумы волны называют *гребнями волны*, а

расстояние между соседними гребнями называют *длиной волны* λ .

Форма волны характеризуется длиной и амплитудой волны.

На рис. 16.3, *а* схематически изображены две волны с одинаковой амплитудой, но разными длинами волн, а на рис. 16.3, *б* — две волны с разными амплитудами, но одинаковой длиной волны.

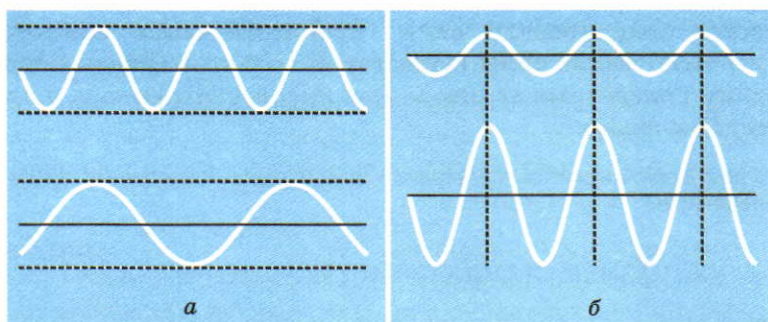


Рис. 16.3. Волны с одинаковой амплитудой, но разной длиной волны (*а*); волны с одинаковой длиной волны, но разной амплитудой (*б*)

? Во сколько раз отличаются длины волн, представленных на рис. 16.3, *а*? амплитуды волн — на рис. 16.3, *б*?

Скорость, с которой перемещаются гребни волн, называют *скоростью волны* v .

Найдем соотношение между скоростью, длиной и частотой волны.

Через промежуток времени, равный периоду T , каждая точка среды, в которой распространяется волна, вернется в прежнее положение, совершив одно полное колебание, а волна сместится в пространстве вдоль направления своего распространения на расстояние, равное длине волны λ . Следовательно, *скорость волны*

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu.$$

? Чему равна скорость волны, если ее длина 10 см, а частота 10 Гц?

При распространении волн частицы среды колеблются около положений равновесия. Поэтому *волны не переносят вещество*.

Однако *волны переносят энергию*, потому что при распространении волны частицы среды начинают колебаться, а колеблющиеся частицы обладают энергией.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Механические волны — это возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Распространение волн обусловлено взаимодействием частиц среды.
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют продольными. Продольные волны могут распространяться в любой среде.
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются поперек распространения волны, называют поперечными. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.
- Частотой волны называют частоту ν колебаний каждой точки среды. Она равна частоте колебаний тела — источника волн. Периодом волны называют величину T , обратную частоте: $T = \frac{1}{\nu}$. Период волны совпадает с периодом колебаний тела — источника волн.
- Амплитудой волны называют амплитуду колебаний частиц среды, то есть модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия.
- Длиной волны λ называют расстояние между соседними гребнями.
- Скоростью волны называют скорость, с которой перемещаются гребни волн.
- Соотношение между скоростью, длиной и частотой волны: $v = \lambda \nu$.
- Волны не переносят вещество, но переносят энергию.



Первый уровень

1. Что представляют собой механические волны? Приведите примеры таких волн.
2. Какие волны называют продольными? В каких средах могут распространяться продольные волны?
3. Какие волны называют поперечными? В каких средах могут распространяться поперечные волны?
4. Что такое частота волны? амплитуда?
5. Что называют гребнями волн? Что такое длина волны?
6. Что такое скорость волны? Как связана скорость волны с длиной волны и частотой?
7. Какова скорость волны, если ее длина 50 см, а частота 2 Гц?
8. Переносят ли волны вещество? энергию?

Второй уровень

9. Волна ударяет в борт стоящего на якоре корабля каждые 2 с, а расстояние между соседними гребнями волн равно 3 м. Какова скорость волны?
10. Длина первой волны 1 м, а ее частота 2 Гц. Длина второй волны 40 см, а период 0,1 с. Скорость какой волны больше? Во сколько раз?
11. Составьте задачу о волнах, ответ у которой был бы: «10 Гц».

§ 17. ЗВУК

1. Источники звука
2. Распространение и отражение звука
3. Громкость, высота и тембр звука
- 4. Неслышимые звуки

1. ИСТОЧНИКИ ЗВУКА

Прислушайтесь: отовсюду мы слышим разные *звуки*. Это звуки голосов, пение птиц, звуки радио, телевизора и музыкальных инструментов, гром во время грозы, шум городского транспорта, шелест листьев.

Благодаря чему же возникает звук? Как он распространяется? Почему мы его слышим?



Троньте гитарную струну, и вы услышите звук. Присмотритесь к звучащей струне: она теряет четкое очертание, поскольку колеблется с большой частотой (третья сверху струна на рис. 17.1, а). Если положить руку на струну, звук прекратится, а очертание струны станет четким.



Рис. 17.1. Источники звука — музыкальные инструменты

Для второго опыта возьмите металлическую кастрюлю. Ударьте в дно, и вы услышите громкий звук. Поднесите к кастрюле подвешенный на нити шарик для настольного тенниса. Как только шарик коснется кастрюли, он отскочит в сторону. Это означает, что кастрюля колеблется. Звучащая кастрюля — прообраз ударных музыкальных инструментов (рис. 17.1, б).

Таким образом, наши опыты показывают, что источниками звуков являются колеблющиеся тела.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Поместим под колокол воздушного насоса электрический звонок на поролоновой подушечке. Включим звонок — его будет хорошо слышно (рис. 17.2, а). Но если мы начнем откачивать воздух из-под колокола, звук будет становиться все тише и тише, хотя сквозь стекло хорошо видно, что молоточек продолжает ударять в чашку звонка (рис. 17.2, б).

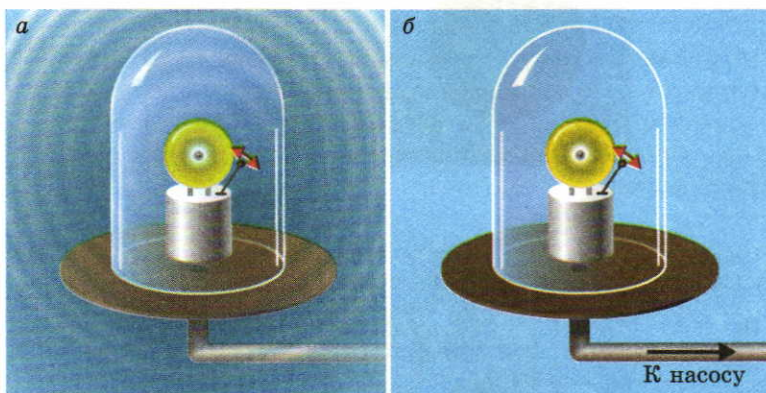


Рис. 17.2. Опыт, доказывающий, что для распространения звука нужна среда

Этот опыт доказывает, что

для распространения звука необходима среда.

Часто этой средой является *воздух*. Колеблущееся тело создает *сгущения и разрежения воздуха*, которые распространяются в воздухе в виде *продольных волн*.

Откачав воздух из-под колокола, мы разорвали «воздушную связь» между звонком и ухом — и перестали слышать звук звонка.

«Великое безмолвие» космоса обусловлено тем, что звук не распространяется в пустоте. А свет, наоборот, лучше всего распространяется именно в пустоте. Поэтому мы видим далекие звезды, но не слышим грохота космических катастроф, например, когда взрываются звезды.

СКОРОСТЬ ЗВУКА

Скорость распространения звуковых волн в среде называют *скоростью звука* в данной среде.

В таблице приведены примерные значения скорости звука в разных средах.

Вещество	Скорость звука, м/с	Вещество	Скорость звука, м/с
Воздух	340	Стекло	4500
Вода	1500	Сталь	5000
Кирпич	3600	Алмаз	18 350

Мы видим, что скорость звука в разных средах отличается в десятки раз. Можно заметить, что скорость звука в жидкостях намного больше, чем в газах, а в твердых телах — еще больше. Наибольшая скорость звука в самом твердом из известных веществ — в алмазе.

Обратите внимание на то, что скорость звука во много раз меньше скорости света, например, скорость звука в воздухе почти в миллион раз меньше скорости света.

? Наблюдая издали за движениями человека, работающего молотком, можно заметить, что звук удара слышится не в момент удара, а когда человек поднимает руку с молотком для следующего удара. Как это объяснить?

ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА

Вам, конечно, доводилось слышать эхо. Это результат *отражения* звука: звуковые волны отражаются от различных препятствий — даже от облаков. Иногда можно услышать даже многократное эхо — результат нескольких отражений.

Эхом объясняются и продолжительные раскаты грома: звук отражается от облаков.

3. ГРОМКСТЬ, ВЫСОТА И ТЕМБР ЗВУКА



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Возьмем камертон — прибор, представляющий собой массивную вилку с двумя ножками, укрепленную на деревянном корпусе (рис. 17.3, а). Если ударить по ножке камертона резиновым молоточком, ножки начнут колебаться, и мы услышим звук.



Рис. 17.3. Камертон (а) и запись звуковых колебаний (б)

Прикрепим к ножке камертона острие и, ударив по ножке, быстро проведем острием по закопченному стеклу.

Мы увидим знакомый волнообразный след, изображенный на рис. 17.3, б: он похож на песочный след колеблющегося маятника (см. § 15. *Механические колебания*). Это запись звуковых колебаний камертона.

Сопоставляя громкость звучания камертона с амплитудой его колебаний, можно заметить: чем громче звучит камертон, тем больше амплитуда колебаний. Итак,

громкость звука определяется амплитудой¹ звуковых волн.

Возьмем теперь два камертона разного размера. Мы заметим, что меньший камертон издает более высокий звук. Повторив описанный выше опыт, мы заметим, что частота колебаний меньшего камертона больше. Значит,

высота звука определяется частотой колебаний звучащего тела: чем больше частота колебаний, тем выше звук.

Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания с частотой от 16 до 20 000 Гц.

¹ Воспринимаемая ухом громкость зависит также от высоты звука (см. ниже), так как чувствительность уха к звукам разной частоты различна.

Но звуки, даже имеющие одинаковую громкость и высоту, могут значительно различаться. Например, звук скрипки легко отличить от звука трубы той же самой громкости и частоты. Качество звука, определяющее его характерную окраску, называют *тембром*. Тембр звука определяется наличием колебаний с более высокими частотами, кратными основной частоте звука.



Может ли человек слышать звук, если длина звуковой волны равна 1 м?



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

4. НЕСЛЫШИМЫЕ ЗВУКИ

УЛЬТРАЗВУК

Если частота колебаний тела больше 20 000 Гц, оно излучает *ультразвук*. Человек не слышит ультразвук, но его прекрасно слышат некоторые животные. Например, собаки слышат звуковые колебания с частотой до 60 000 Гц, а дельфины — даже до 200 000 Гц.

Летучие мыши живут часто в полной темноте, например в пещерах. Но они никогда не натыкаются на стены да к тому же прекрасно ловят насекомых в полете. Как же им это удается?

Ученые установили, что летучие мыши как бы «видят ушами»: они ориентируются и охотятся, испуская ультразвук и ловя его отражение своими огромными ушами (рис. 17.4).

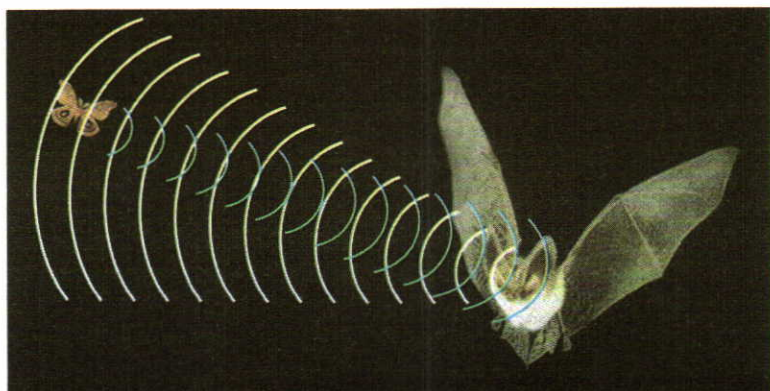


Рис. 17.4. Летучая мышь обнаруживает бабочку по отраженному ультразвуку

Ультразвук широко применяют в различных областях. Например, с его помощью измеряют глубину моря. С корабля посылают ультразвуковой сигнал и засекают, сколько времени нужно ультразвуку, чтобы достичь дна и, отразившись, вернуться обратно (рис. 17.5). Прибор для измерения глубины дна называют *эхолотом*.

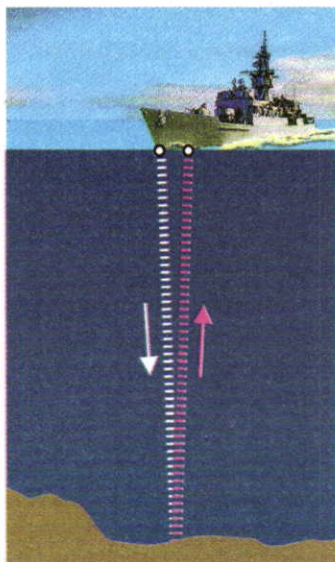


Рис. 17.5. Измерение глубины с помощью эхолота

С помощью ультразвука «просвечивают» металлические изделия: это позволяет обнаружить в них трещины и пустоты.

Ультразвук широко используют и в медицине. Например, ультразвуковое исследование (УЗИ) внутренних органов предпочитают рентгеновскому, поскольку оно безопаснее для организма.

ИНФРАЗВУК

Тела, колеблющиеся с частотами, меньшими 20 Гц, испускают *инфразвук*. Инфразвук вызывают, например, землетрясения и вибрация тяжелых механизмов.

Человек не слышит инфразвук ухом, но иногда воспринимает его всем организмом как неприятное ощущение. Воз-

можно, инфразвук хорошо чувствуют некоторые животные: известно, что собаки и кошки пытаются выбраться из дома перед землетрясением.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Источниками звуков являются колеблющиеся тела.
- Для распространения звука необходима среда.
- Скорость звука в разных средах различна. Скорость звука в воздухе 340 м/с.
- Эхо — результат отражения звука.
- Громкость звука определяется амплитудой звуковых волн, а высота звука — частотой звуковых волн.
- Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания с частотой от 16 до 20 000 Гц.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Какие тела являются источниками звука?
2. Почему для распространения звука необходима среда?
3. Продольными или поперечными являются звуковые волны в воздухе? Обоснуйте ваш ответ.
4. Чему равна скорость звука в воздухе? В каких средах скорость звука наименьшая? наибольшая?
5. Вы слышали удар грома через 10 с после вспышки молнии. На каком примерно расстоянии от вас была эта молния?
6. Чем определяются громкость и высота звука?

Второй уровень

7. Звуки, издаваемые насекомыми во время полета, вызваны взмахами крылышек. Почему комар пищит, муха жужжит, а шмель — гудит?
8. Какова длина волны самого низкого звука, который может слышать человек? самого высокого?

9. Где и как используют отражение звука?
10. Что такое ультразвук? Как его используют?
11. Отраженный сигнал эхолота вернулся через 10 с. Какова глубина моря в этом месте?
12. Составьте задачу о звуке, ответ у которой был бы: «Человек не услышит, а дельфин услышит».



ГЛАВНОЕ В § 15–17

- Механическими колебаниями называют периодическое движение тела, при котором оно попеременно отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону.
- Амплитудой колебаний называют наибольшее смещение колеблющегося тела от положения равновесия.
- Периодом T колебаний называют промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание.
- Частотой колебаний ν называют физическую величину, равную числу колебаний за единицу времени. Единица частоты колебаний — герц (Гц): $1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}}$.
- Период и частота связаны соотношением $\nu = \frac{1}{T}$.
- Колебания, при которых смещение тела от положения равновесия изменяется по закону синуса (или косинуса), называют гармоническими.
- При колебаниях происходят периодические превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно.
- Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити, g — модуль ускорения свободного падения.
- Период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, где m — масса груза, k — жесткость пружины.

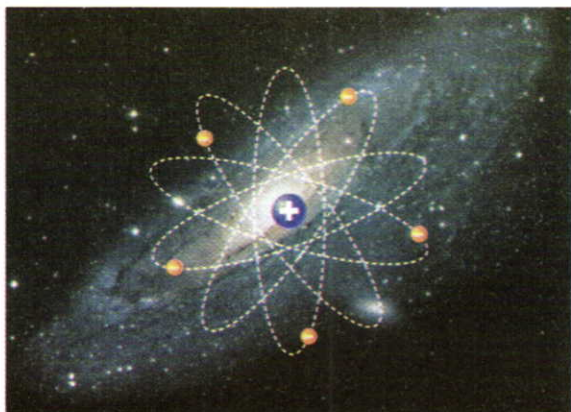
- Механические волны — это возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Распространение волн обусловлено взаимодействием частиц среды.
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют продольными. Продольные волны могут распространяться в любой среде.
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются поперек распространения волны, называют поперечными. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.
- Частотой волны называют частоту ν колебаний каждой точки среды. Она равна частоте колебаний тела — источника волн. Периодом волны называют величину T , обратную частоте: $T = \frac{1}{\nu}$. Период волны совпадает с периодом колебаний тела — источника волн.
- Амплитудой волны называют амплитуду колебаний частиц среды, то есть модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия.
- Длиной волны λ называют расстояние между соседними гребнями.
- Скоростью волны называют скорость, с которой перемещаются гребни волн.
- Соотношение между скоростью, длиной и частотой волны: $v = \lambda \nu$.
- Волны не переносят вещество, но переносят энергию.
- Источниками звуков являются колеблющиеся тела.
- Для распространения звука необходима среда.
- Скорость звука в разных средах различна. Скорость звука в воздухе 340 м/с.
- Эхо — результат отражения звука.

- Громкость звука определяется амплитудой звуковых волн, а высота звука — частотой звуковых волн.
- Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания с частотой от 16 до 20 000 Гц.

Глава 2

АТОМЫ И ЗВЕЗДЫ

- Строение атома.
Испускание и поглощение света атомами
- Атомное ядро. Радиоактивность
- Ядерные реакции
- Ядерная энергетика
- Солнечная система
- Звезды и галактики



1. Опыт Резерфорда
2. Планетарная модель атома
- 3. Спектры излучения
- 4. Спектры поглощения
- 5. Теория Бора

1. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Как вы знаете, слово «атом» в переводе с греческого означает «неделимый». И действительно долгое время атомы считались мельчайшими неделимыми частицами вещества.

Однако в конце 19-го века благодаря открытию электрона неделимость атома оказалась под большим сомнением. Действительно, если электроны входят в состав атома, то атом является *составным*.

Электроны заряжены *отрицательно*, а вещество в целом электрически нейтрально. Значит, суммарный отрицательный заряд электронов компенсирует «нечто» положительно заряженное, что тоже входит в состав атома. Что же представляет собой это «нечто»?

В поисках ответа на этот вопрос английский физик Э. Резерфорд в начале 20-го века решил «прощупать» атомы с помощью быстрых заряженных частиц, то есть изучить, как отклоняются эти частицы, пролетая сквозь атомы.

Такие частицы в распоряжении ученого были: их испускал недавно открытый редкий металл радий. Скорость этих частиц, названных α -частицами, составляла десятки тысяч километров в секунду, а масса α -частицы примерно в 8000 раз больше массы электрона.

Резерфорд поставил такой опыт. Малое количество радия поместили на дно узкого канала, просверленного в свинцовом цилиндре (рис. 18.1). Из канала выходил параллельный пучок α -частиц и падал на тонкую металлическую фольгу. За фольгой находился экран, покрытый веществом, которое светилось при попадании на него α -частиц. По светящимся точкам на экране можно было изучать, как отклоняются α -частицы, когда они сталкиваются с атомами, из которых состоит фольга.

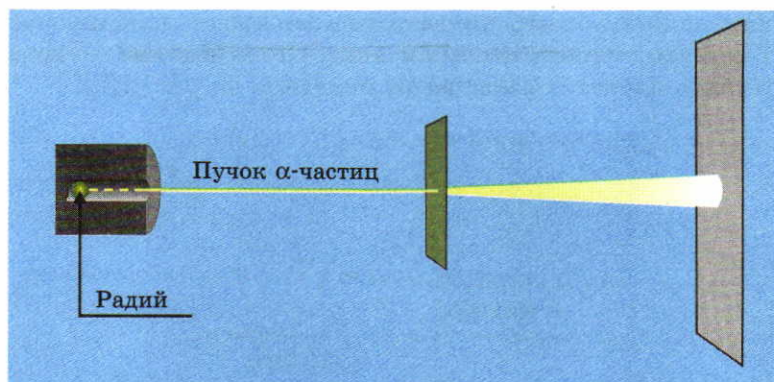


Рис. 18.1. Схема опыта Резерфорда

Столкновения с электронами не могли существенно изменить направления движения намного более массивных α -частиц. И действительно, опыты показали, что после прохождения через фольгу пучок α -частиц немного расходился. Это указывало на то, что α -частицы пролетали сквозь фольгу, почти не отклоняясь от своего первоначального направления.

На этом многие ученые закончили бы опыт, но Резерфорд решил «на всякий случай» выяснить: а не могут ли α -частицы отклоняться на *большие* углы? Могут ли они, например, отскочив от фольги, полететь *назад*?

Научная интуиция не подвела ученого: его сотрудникам действительно удалось наблюдать α -частицы, которые отскочили назад!

Передадим слово самому Резерфорду:

«По секрету могу сказать, что сам я не верил, что это возможно. Это было столь же невероятным, как если бы пушечным снарядом выстрелили в лист бумаги, и снаряд, отскочив назад, попал бы в стрелявшего. Тогда у меня и возникла идея об очень малом ядре атома, где сосредоточена практически вся масса атома и весь положительный заряд»¹.



Э. Резерфорд
(1871—1937)

¹ Цитата приводится в сокращении.

Дальнейшие опыты подтвердили это предположение ученого. Так было открыто *атомное ядро*. Столкновение α -частицы с атомным ядром схематически показано на рис. 18.2.

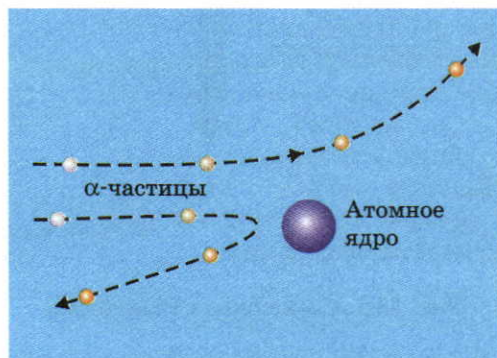


Рис. 18.2. Схема столкновения α -частицы с ядром атома

2. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

По результатам своего опыта Резерфорд оценил размер атомного ядра. Результат поразил ученого и других физиков: оказалось, что *атомное ядро в десятки тысяч раз меньше атома!*

Расчеты показали, что размер атомного ядра $10^{-14} - 10^{-15}$ м, в то время как размер атома примерно 10^{-10} м.

Чтобы и вы смогли разделить удивление физиков того времени, представьте: если увеличить атом до размера футбольного поля, то атомное ядро окажется булавочной головкой посреди этого поля! Однако в крошечном атомном ядре сосредоточена практически вся масса атома.

Казалось, что строение атома очень напоминает строение Солнечной системы: ведь и размеры Солнца («ядра» Солнечной системы) очень малы по сравнению с размерами орбит планет («электронов» Солнечной системы), но в Солнце сосредоточена почти вся масса Солнечной системы.

Поэтому Резерфорд предложил *планетарную модель атома*, согласно которой вокруг очень малого, и сравнительно массивного положительно заряженного ядра движутся легкие электроны — подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца (рис. 18.3).

Поскольку атом в целом электрически нейтрален, положительный заряд ядра равен по модулю суммарному заряду всех движущихся вокруг ядра электронов.

Планетарная модель атома поначалу вызвала восторг не только ученых, но и поэтов: казалось, природа проявила высшую «экономность», повторив «великое» в «малом». Русский поэт В. Брюсов даже написал стихотворение, начинающееся так:

Быть может, эти электроны
Миры, где пять материков,
Искусства, знания, войны, троны
И память сорока веков!

Однако дальнейшее развитие физики показало, что планетарная модель атома многому не дает объяснения. Для объяснения строения атома в 20-м веке была создана новая физическая теория, названная *квантовой теорией*. С ее основами вы познакомитесь в курсе физики старшей школы.

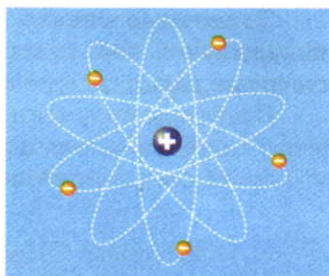


Рис. 18.3. Планетарная модель атома



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как вы знаете, с помощью стеклянной призмы солнечный свет можно разложить в *спектр* — широкую полосу со всеми цветами радуги (рис. 18.4).



Рис. 18.4. Спектр излучения Солнца

Исследования показали, что *каждому цвету соответствует электромагнитное излучение определенной частоты*. Среди цветов радуги фиолетовому цвету соответствует наибольшая частота, а красному — наименьшая.

Солнечный спектр — пример *сплошного* спектра. Опыты показывают, что сплошные спектры излучения дают также *твердые раскаленные и жидкие тела*.

Спектры излучения изучают *спектроскопом*. Действие этого прибора основано на разложении света с помощью треугольной стеклянной призмы.



ПОСТАВИМ ОПЫТ

Внесем в пламя газовой горелки кристаллики поваренной соли (NaCl) и будем наблюдать пламя в спектроскоп.

Мы увидим яркие желтые линии (рис. 18.5). Это *линейчатый спектр* раскаленных паров натрия, образовавшихся при расщеплении молекул поваренной соли в пламени горелки.



Рис. 18.5. Спектр излучения паров натрия

Линейчатые спектры, то есть спектры, которые состоят из набора ярких линий, излучают вещества в газообразном *атомарном* состоянии¹.

На рис. 18.6 приведен еще один линейчатый спектр. Это спектр излучения атомарного водорода.



Рис. 18.6. Спектр излучения атомарного водорода

У каждого химического элемента свой «индивидуальный» линейчатый спектр излучения, отличный от спектров всех других элементов. Это позволяет с высокой точностью определять химический состав тел.

Определение химического состава вещества по линейчатым спектрам называют *спектральным анализом*.

¹ В атомарном состоянии вещество состоит из одноатомных молекул.

С помощью спектрального анализа открыли новые химические элементы. Например, гелий (от греч. «гелиос» — Солнце) назван так потому, что его сначала открыли с помощью спектрального анализа в солнечной атмосфере и только потом обнаружили на Земле. Спектральный анализ позволил определить химический состав многих звезд. Оказалось, что все они состоят из химических элементов, которые есть и на Земле!

Загадка линейчатых спектров. Когда вещество находится в газообразном атомарном состоянии, свет излучают изолированные атомы. Поэтому линейчатые спектры излучения указывают на то, что

изолированные атомы излучают свет только определенных частот.

Этот очень важный факт не находил объяснения в рамках классической физики¹. Объяснить это смогла только квантовая теория, о которой мы упоминали выше.

4. СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

В начале 19-го века английский ученый У. Волластон и независимо от него немецкий ученый Й. Фраунгофер, изучая с помощью спектроскопа солнечный спектр, обнаружили на фоне сплошного спектра загадочные *темные линии* (рис. 18.7), названные впоследствии фраунгоферовыми.



Рис. 18.7. Темные линии в солнечном спектре

Немецкий ученый Г. Кирхгоф заметил, что положение двух близко расположенных *темных* линий в этом спектре совпадает с положением уже знакомых нам *ярких* желтых линий в спектре паров натрия (см. рис. 18.5). Кирхгоф предположил, что эти темные линии — результат *поглощения* солнечного света парами натрия во внешней атмосфере Солнца.

¹ Классической физикой принято называть совокупность физических теорий, построенных до начала 20-го века.

Чтобы проверить свою догадку, ученый изучил в лаборатории спектр солнечного света, прошедшего сквозь пары натрия. На фоне непрерывного спектра он увидел *темные* линии, положение которых совпало с линиями излучения паров натрия. Это подтвердило предположение ученого.

Непрерывный спектр излучения, на фоне которого видны темные линии, называют *спектром поглощения*. Кирхгоф предположил, что

для каждого химического элемента линейчатые спектры излучения и поглощения совпадают.

Опыты подтвердили это предположение. На рис. 18.8 в качестве примера приведен спектр поглощения атомарного водорода. Сравните его со спектром излучения атомарного водорода, приведенным на рис. 18.6.



Рис. 18.8. Спектр поглощения атомарного водорода

Итак, темные линии на фоне солнечного спектра представляют собой «суммарный» спектр поглощения всех химических элементов, присутствующих в солнечной атмосфере. Среди темных линий на фоне солнечного спектра и были открыты еще неизвестные линии поглощения гелия.



Найдите среди темных линий на солнечном спектре (см. рис. 18.7) линии, соответствующие спектру поглощения водорода.

5. ТЕОРИЯ БОРА

Несмотря на свою привлекательность, планетарная модель атома не давала ответов на многие вопросы.

Прежде всего планетарная модель атома не могла объяснить *стабильность атомов*. Наблюдения и опыты показывают, что многие атомы существуют, не изменяясь, *миллиарды лет*. В планетарной модели электроны движутся по круговым орбитам, то есть с ускорением (см. § 5. *Равномерное движение по окружности*). Согласно классической физике при движении с ускорением электроны должны излучать электромагнитные волны и вследствие этого терять энергию. В результа-

те электроны должны были бы упасть на атомное ядро через несколько *миллиардных долей секунды*. Какое огромное несоответствие теории с опытом!

Кроме того, планетарная модель атома не объясняла, почему атомы излучают и поглощают *линейчатые* спектры, то есть свет только с определенным набором частот.

Первую теорию строения атома, которая в какой-то мере отвечала на поставленные выше вопросы, предложил в начале 20-го века датский физик Н. Бор. Он предположил, что электроны в атомах движутся только по определенным орбитам, называемым *стационарными*. Когда электрон находится на стационарной орбите, атом не излучает и не поглощает электромагнитного излучения. А при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую атом излучает или поглощает электромагнитное излучение только определенной частоты. Это позволило объяснить стабильность атомов, а также особенности излучения и поглощения света атомами.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Атом является составным: он состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронов.
- Существование атомного ядра открыл на опыте английский физик Э. Резерфорд. Он предложил планетарную модель атома, согласно которой электроны движутся вокруг атомного ядра подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.
- Сплошные спектры излучения дают твердые раскаленные и жидкие тела.
- Линейчатые спектры излучают вещества в газообразном атомарном состоянии. У каждого химического элемента свой линейчатый спектр излучения, отличный от спектров других элементов. Это позволяет с высокой точностью определять химический состав вещества.
- Определение химического состава вещества по линейчатым спектрам называют спектральным анализом.

- Непрерывный спектр излучения, на фоне которого видны темные линии, называют спектром поглощения. Для каждого химического элемента линейчатые спектры излучения и поглощения совпадают.
- Согласно предложенной Н. Бором теории атома электроны в атомах движутся только по определенным орбитам, называемым стационарными. Когда электрон находится на стационарной орбите, атом не излучает и не поглощает электромагнитного излучения. При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую атом излучает или поглощает электромагнитное излучение только определенной частоты.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. На основании каких опытов и наблюдений возникло предположение, что атом является составным?
2. Опишите кратко опыт Резерфорда. В чем состоял главный результат этого опыта?
3. Почему предложенную Резерфордом модель атома назвали планетарной моделью?

Второй уровень

4. Какие тела дают сплошной спектр излучения?
5. В каком состоянии находятся тела, которые дают линейчатый спектр излучения?
6. Что представляет собой спектральный анализ? На чем он основан? Приведите примеры применения спектрального анализа.
7. Чем обусловлены темные линии в солнечном спектре?
8. Чем отличаются спектры поглощения от спектров излучения и что у них общего? Какой отсюда следует вывод?
9. Каковы основные недостатки планетарной модели атома?
10. Каковы основные положения теории Бора?

§ 19.

АТОМНОЕ ЯДРО. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1. Протон и нейтрон
2. Строение атомного ядра
3. Радиоактивность
4. Состав радиоактивного излучения
5. Как изменяются массовое и зарядовое числа ядра при радиоактивном излучении?
- 6. Период полураспада

1. ПРОТОН И НЕЙТРОН

После открытия атомного ядра возник вопрос: может, и атомное ядро является *составным*, то есть состоит из каких-то частиц?

Поисками ответа на этот вопрос занялся уже знакомый нам Э. Резерфорд. Он применил свой излюбленный метод — бомбардировку α -частицами.

И действительно, при бомбардировке атомов азота α -частицами обнаружилось, что из атомных ядер вылетают какие-то еще неизвестные частицы. Измерения показали, что они имеют *положительный* заряд, равный по модулю заряду электрона, а их масса совпадает с массой ядра самого легкого атома — атома водорода. Дальнейшее исследование показало, что эти частицы и есть ядра атомов водорода. Резерфорд назвал их *протонами*¹.

Изучая свойства различных ядер, Резерфорд предположил, что в состав ядра входят также *нейтральные* частицы, масса которых примерно равна массе протона. И один из учеников Резерфорда действительно открыл такие частицы. Их называли *нейтронами*.

В отличие от протона и электрона нейтрон не является стабильной частицей. Покинув атомное ядро, нейтрон вскоре распадается на протон, электрон и еще одну нейтральную частицу.

2. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА

Протонно-нейтронная модель ядра. После открытия нейтрона советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра*.

¹ От греч. «протос» — первый. Такое название для протона предполагало, что эта частица является как бы «первоосновой» вещества.

Согласно этой модели

ядра атомов состоят из положительно заряженных *протонов* и нейтральных *нейтронов*.

Протоны и нейтроны получили общее название — *нуклоны* (от лат. «нуклеус» — ядро). Масса одного нуклона примерно в 2000 раз больше массы электрона.

Число протонов в ядре называют *зарядовым числом* и обозначают Z .

Поскольку электрический заряд протона равен по модулю заряду электрона, то заряд ядра равен Ze , где e — элементарный заряд (модуль заряда электрона).

Зарядовое число ядра совпадает с номером соответствующего химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Именно зарядовым числом ядра атома определяются химические свойства элемента.

Ядра с одним и тем же зарядовым числом могут содержать разное число нейтронов. Такие ядра называют *изотопами* (в переводе с греч. «в одном и том же месте»), поскольку всем им соответствует одна и та же ячейка Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева.

Число нейтронов в ядре обозначают N .

Величину $A = Z + N$, равную общему числу нуклонов в данном ядре, называют *массовым числом*.

Массовое число названо так потому, что масса ядра приближенно равна произведению массового числа на массу одного нуклона (напомним, что массы протона и нейтрона примерно равны).

Ядро атома обозначают так же, как и соответствующий химический элемент, ставя *перед* ним вверху массовое число, а внизу — зарядовое число.

Например, ядро углерода с массовым числом 12 и зарядовым числом 6 обозначают $^{12}_6\text{C}$, а ядро гелия — ^4_2He . Как вы, наверное, догадались, ядра гелия — это и есть α -частицы.

Протон обозначают ^1_1p , а нейтрон — ^1_0n .

На рис. 19.1 схематически изображены наиболее легкие ядра (в основном это изотопы водорода и гелия) и указаны их обозначения.

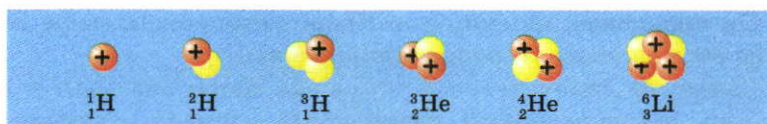


Рис. 19.1. Схематическое изображение наиболее легких ядер

Ядерные силы. Между одноименно (положительно) заряженными протонами, расположенными очень близко друг к другу в крошечном атомном ядре, действуют огромные электрические силы отталкивания. Что же тогда удерживает протоны от разлета? Дело в том, что

между нуклонами действуют очень большие силы притяжения, которые называют *ядерными силами*.

Ядерные силы — чрезвычайно *короткодействующие*: они действуют на расстояниях, не превышающем 10^{-15} м (размер нуклона). Но зато на таких малых расстояниях ядерные силы во много раз превышают электрические силы.

3. РАДИОАКТИВНОСТЬ

В конце 19-го века французский физик А. Беккерель обнаружил, что соли урана самопроизвольно испускают неизвестное излучение, которое засвечивает фотопластинку. После этого французские физики супруги М. Склодовская-Кюри¹ и П. Кюри установили, что подобное излучение испускают и некоторые другие химические элементы, например торий.



¹ Мария Склодовская родилась в Польше.

По предложению супругов Кюри самопроизвольное излучение атомов назвали *радиоактивностью*¹.

Самое же замечательное открытие Кюри состояло в том, что они открыли новый химический элемент, радиоактивность которого была во много раз выше, чем у других ранее открытых радиоактивных элементов. Новый химический элемент назвали *радием*. Как вы уже знаете, вылетающие из радия α -частицы позволили Резерфорду обнаружить существование атомного ядра (см. § 18. *Строение атома. Испускание и поглощение света атомами*).

Крошечная крупинка радия массой 0,1 г выделяет в течение одного часа энергию, которой хватило бы для того, чтобы забросить футбольный мяч на пятый этаж (около 60 Дж). Причем такую энергию крупинка радия выделяет час за часом, оставаясь при этом совершенно неизменной.

Дальнейшие исследования показали, что изменения все-таки происходят: в результате радиоактивного излучения атомы радия превращаются в атомы инертного газа радона. Однако расчеты показали, что «запаса энергии» в крупинке радия хватило бы для того, чтобы поднять трех слонов на самую высокую гору Земли!

Казалось бы, эта энергия возникает ниоткуда, что заставляло усомниться в справедливости «главного» закона физики — закона сохранения энергии. Но в многочисленных опытах было установлено, что он все-таки выполняется во всех явлениях, в том числе и связанных с превращениями атомных ядер.

4. СОСТАВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Чтобы выяснить, какова природа радиоактивного излучения, Резерфорд решил поместить узкий пучок излучения в магнитное поле. Дело в том, что в магнитном поле на движущуюся заряженную частицу действует сила (ее называют силой Лоренца), под действием которой положительно и отрицательно заряженные частицы отклоняются в *противоположные* стороны. А движущиеся нейтральные частицы не отклоняются магнитным полем.

На рис. 19.2 изображена схема этого опыта Резерфорда.

¹ От лат. «радио» — излучаю.

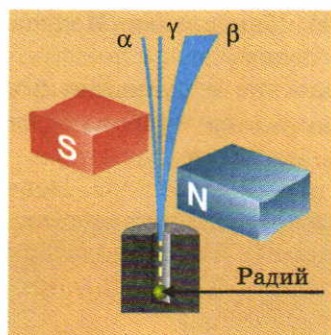


Рис. 19.2. Схема¹ опыта Резерфорда по определению состава радиоактивного излучения

Проходя между полюсами магнита, направленный пучок излучения расщепляется на три пучка. Резерфорд назвал их α -, β - и γ -лучами.

Дальнейшие исследования показали, что

α -лучи — это пучок ядер гелия ${}^4_2\text{He}$,

β -лучи — пучок быстрых электронов (электроны обозначают ${}^0_{-1}e$),

γ -лучи — поток электромагнитного излучения очень большой энергии (его называют γ -излучением).

5. КАК ИЗМЕНЯЮТСЯ МАССОВОЕ И ЗАРЯДОВОЕ ЧИСЛА ЯДРА ПРИ РАДИОАКТИВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ?

Как мы уже знаем, α -частица является ядром гелия, поэтому ее массовое число равно 4, а зарядовое число равно 2. Следовательно,

при испускании ядром α -частицы массовое число ядра уменьшается на 4, а зарядовое число ядра уменьшается на 2.

Итак, при испускании α -частицы ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится на две клетки ближе к началу Периодической таблицы химиче-

¹ Масштаб на рисунке не соблюден.

ских элементов Д. И. Менделеева. Испускание α -частицы называют также α -распадом.

Например, вследствие испускания α -частицы ядро радия превращается в ядро радона: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$. Схематически это показано на рис. 19.3.

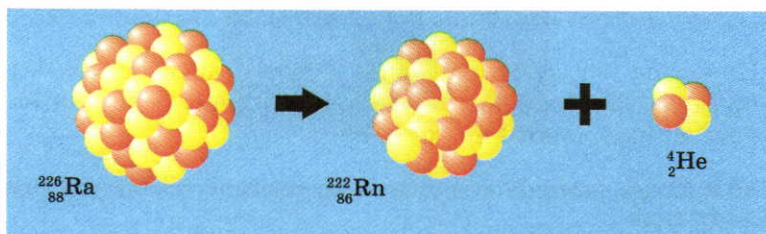


Рис. 19.3. α -распад ядра радия

Испускание электронов ядрами (β -излучение) возникает в результате распада входящих в состав ядра нейтронов на протоны, электроны и некоторые нейтральные частицы. В результате один из нейтронов ядра превращается в протон, то есть зарядовое число ядра увеличивается на 1. Следовательно,

при испускании ядром β -частицы (электрона) массовое число ядра остается неизменным, а зарядовое — *увеличивается* на 1.

Таким образом, при испускании β -частицы (электрона) ядро превращается в ядро другого химического элемента, который находится *на одну клетку дальше от начала* Периодической таблицы химических элементов Д. И. Менделеева. Испускание β -частицы называют также β -распадом.

Например, в результате испускания электрона ядро изотопа свинца ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ превращается в ядро изотопа висмута: ${}^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{214}_{83}\text{Bi} + {}^0_{-1}e$.

Наконец, при γ -излучении заряд ядра не изменяется. Число нуклонов в ядре при γ -излучении также не изменяется. Следовательно,

при γ -излучении ядро остается ядром того же химического элемента с тем же массовым числом.



6. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

В результате радиоактивных распадов число радиоактивных ядер данного изотопа уменьшается со временем.

Периодом полураспада для данного изотопа называют промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа ядер.

Например, период полураспада изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$ равен 4,5 млрд лет, а изотопа $^{235}_{92}\text{U}$ — «всего» 700 млн лет.

Период полураспада радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ по геологическим меркам очень мал: всего лишь 1600 лет. Радий существует сегодня на Земле только потому, что он постоянно возобновляется при радиоактивном распаде урана.

Исследования показали, что распад любого атомного ядра является *случайным* событием: все атомы данного изотопа, существующие в данный момент, имеют *одинаковые* шансы распасться в течение следующей секунды.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Ядра атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов. Заряд протона равен по модулю заряду электрона, а массы протона и нейтрона примерно равны.
- Протоны и нейтроны имеют общее название — нуклоны. Масса одного нуклона примерно в 2000 раз больше массы электрона.
- Число протонов в ядре называют зарядовым числом и обозначают Z . Электрический заряд ядра Ze .
- Зарядовое число ядра совпадает с номером соответствующего химического элемента в Периодической таблице химических элементов Д. И. Менделеева. Зарядовым числом ядра атома определяют химические свойства элемента.

- Число нейтронов в ядре обозначают N . Величину $A = Z + N$, равную общему числу нуклонов в данном ядре, называют массовым числом. Масса ядра приблизительно равна произведению массового числа на массу одного нуклона.
- Ядро атома обозначают так же, как и соответствующий химический элемент, ставя перед ним сверху массовое число, а внизу — зарядовое число. Например, ядро углерода с массовым числом 12 и зарядовым числом 6 обозначают $^{12}_6\text{C}$, а ядро гелия (α -частицу) — ^4_2He .
- Между нуклонами действуют очень большие силы притяжения, которые называют ядерными силами.
- Состав радиоактивного излучения: α -лучи (пучок ядер гелия ^4_2He); β -лучи (пучок быстрых электронов); γ -лучи — пучок электромагнитного излучения очень большой энергии (γ -излучение).
- При испускании ядром α -частицы массовое число ядра уменьшается на 4, а зарядовое число ядра уменьшается на 2.
- При испускании ядром β -частицы (электрона) массовое число ядра остается неизменным, а зарядовое — увеличивается на 1.
- При γ -излучении ядро остается ядром того же химического элемента с тем же массовым числом.
- Периодом полураспада для данного изотопа называют промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа ядер.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Каковы свойства протона? Ядром какого химического элемента является эта частица?
2. Каковы свойства нейтрона?
3. Каков состав атомного ядра?
4. Каково общее название протонов и нейтронов?
5. Как называют число протонов в ядре и как его обозначают?

6. Как называют число нуклонов в ядре и как его обозначают?
7. Каким числом ядра (зарядовым или массовым) определяется номер химического элемента в Периодической таблице химических элементов Д. И. Менделеева (и химические свойства элемента)?
8. Приведите примеры обозначений нескольких атомных ядер.
9. Какие частицы вылетают из ядра при радиоактивном превращении?
10. Какой из трех типов радиоактивного излучения представляет собой поток: а) положительно заряженных частиц; б) отрицательно заряженных частиц; в) электромагнитного излучения?

Второй уровень

11. Каковы основные свойства ядерных сил?
12. Какие силы действуют между двумя протонами? между протоном и нейтроном? между двумя нейтронами?
13. Как определили на опыте знак заряда частиц, вылетающих при радиоактивных превращениях?
14. Во сколько раз модуль заряда α -частицы больше модуля заряда β -частицы?
15. В результате испускания α -частицы атомное ядро превратилось в ядро другого химического элемента. Где в Периодической таблице химических элементов Д. И. Менделеева расположен этот элемент по отношению к начальному ядру?
16. В результате испускания β -частицы атомное ядро превратилось в ядро другого химического элемента. Где в Периодической таблице химических элементов Д. И. Менделеева расположен этот элемент по отношению к начальному ядру?
17. Изменяются ли массовое и зарядовое числа ядра при γ -излучении?
18. Как существующие в природе радиоактивные элементы могли сохраниться до настоящего времени?
19. Что называют периодом полураспада?
20. Период полураспада некоторого изотопа равен 8 ч. Какая доля от первоначального числа ядер останется через одни сутки?

§ 20. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

1. Ядерные реакции
2. Реакции деления и синтеза
3. Цепная ядерная реакция
- 4. Энергия связи ядра

1. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Как вы уже знаете, в результате радиоактивных превращений одни атомные ядра превращаются в другие.

Изменения атомных ядер при их взаимодействии друг с другом или с другими частицами (в том числе когда частицы испускаются ядрами) называют *ядерными реакциями*.

Уравнения ядерных реакций сходны по виду записи с уравнениями химических реакций: стрелка указывает направление реакции.

В предыдущем параграфе мы уже написали уравнения для двух ядерных реакций. Напомним их: уравнение α -распада радия имеет вид ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$, а уравнение β -распада свинца имеет вид ${}_{82}^{214}\text{Pb} \rightarrow {}_{83}^{214}\text{Bi} + {}_{-1}^0e$.

Опыты показывают, что

в ядерных реакциях сохраняются общее число нуклонов (массовое число) и электрический заряд (зарядовое число).

Отсюда следует, что

сумма верхних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции одинакова (следствие сохранения массового числа);

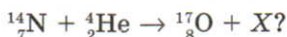
сумма нижних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции одинакова (следствие закона сохранения электрического заряда).



Найдите суммы верхних и нижних индексов в приведенных выше двух уравнениях ядерных реакций. Сравните эти суммы в левой и правой частях уравнений.



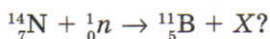
1. Какая частица обозначена буквой X в приведенном ниже уравнении ядерной реакции:



Решение. Чтобы определить вид неизвестной частицы, надо найти, чему равны ее массовое и зарядовое числа. Чтобы найти их, воспользуемся сохранением массового числа (числа нуклонов) и законом сохранения электрического заряда. Сумма массовых чисел (верхних индексов) в левой части реакции: $14 + 4 = 18$, а массовое число образовавшегося изотопа кислорода 17. Следовательно, массовое число неизвестной частицы равно 1. Сумма зарядовых чисел (нижних индексов) в левой части реакции: $7 + 2 = 9$, а зарядовое число ядра кислорода 8. Следовательно, зарядовое число неизвестной частицы равно 1. Таким образом, неизвестная частица — это нуклон (массовое число равно 1), имеющий положительный электрический заряд, равный по модулю заряду электрона (зарядовое число равно 1). Это означает, что неизвестная частица — протон.

Ответ: протон.

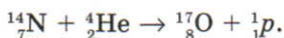
2. Какая частица обозначена буквой X в приведенном ниже уравнении ядерной реакции:



Решение. Используя сохранение массового числа и закон сохранения электрического заряда, получаем, что массовое число неизвестной частицы равно 4, а зарядовое число равно 2. Следовательно, это α -частица.

Ответ: α -частица.

Первое *искусственное* превращение атомных ядер, то есть первую искусственную ядерную реакцию осуществил Резерфорд, бомбардируя α -частицами ядра азота. Уравнение этой реакции имеет вид



Напомним, что именно в этом опыте был открыт протон.

Главное отличие ядерных реакций от химических состоит в том, что

энергия, выделяющаяся в ядерной реакции (для той же массы вещества), может *в миллионы раз* превосходить энергию, выделяющуюся в химических реакциях.

2. РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА

Реакции деления. Так называют реакции, в которых из «тяжелых» ядер с большим массовым числом образуются ядра, «средние» по массовому числу.

В реакциях деления может выделяться много энергии. Например, при делении ядер, содержащихся в уране массой 1 кг, выделяется столько же энергии, сколько можно получить при сгорании целого железнодорожного состава угля. А ведь объем такого куска урана равен примерно объему трех спичечных коробков!

Реакции синтеза. Так называют реакции, в которых из менее массивных ядер образуются более массивные.

Реакции синтеза дают больший «энергетический выход» (в расчете на единицу массы), чем рассмотренные выше реакции деления, поскольку реакции синтеза происходят с *легкими* ядрами. Пример такой реакции мы рассмотрим в следующем параграфе.

Однако осуществить реакцию синтеза намного труднее, чем реакцию деления. Дело в том, что реакции синтеза идут только при очень высоких температурах — в *миллионы* градусов! Поэтому реакции синтеза называют *термоядерными* реакциями.

Именно термоядерные реакции происходят в недрах звезд, в том числе и в недрах Солнца.

Термоядерные реакции — основной источник энергии звезд.

3. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Итальянский физик Э. Ферми догадался, что с помощью нейтронов можно искусственно вызывать ядерные реакции деления. Дело в том, что нейтрон не имеет электрического

заряда и поэтому он, не испытывая электрического отталкивания, может проникнуть в положительно заряженное ядро и вызвать его деление.

Опыты показали, что реакция деления ядер урана, вызванная нейтронами, может стать самоподдерживающейся и даже лавинообразно нарастать. Дело в том, что при делении ядра урана могут испускаться 2—3 нейтрона. Попадая в другие ядра урана, эти нейтроны могут вызвать новые реакции деления. В результате число делящихся ядер может увеличиваться со временем или оставаться постоянным. Такую реакцию называют *цепной ядерной реакцией*. Она схематически изображена на рис. 20.1.

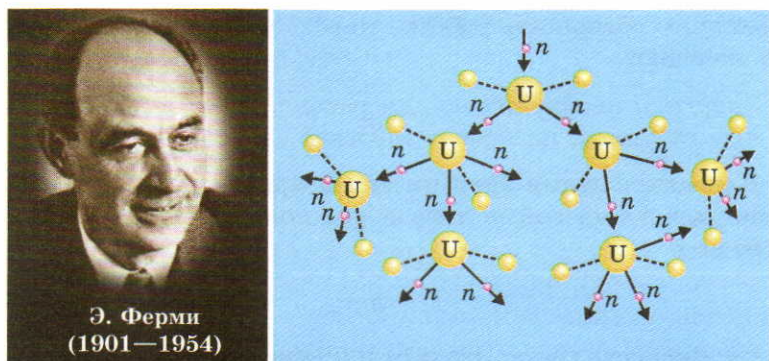


Рис. 20.1. Цепная реакция деления урана

Если во время цепной ядерной реакции число делящихся ядер лавинообразно нарастает, происходит *взрыв*, при котором выделяется огромная энергия. Именно это и происходит при взрыве атомной бомбы.

К счастью, цепную ядерную реакцию удалось сделать *управляемой*, когда число делящихся ядер не нарастает лавинообразно со временем, а остается *постоянным*. Такую цепную реакцию можно использовать, например, для получения электроэнергии. Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называют *ядерным реактором*.

Об использовании ядерных реакторов мы расскажем в следующем параграфе.



4. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Под выделением энергии в ядерной реакции понимают *увеличение суммарной кинетической энергии* ядер и частиц, происходящее в результате реакции. За счет чего же возникает эта энергия, если закон сохранения энергии остается справедливым?

Выделение энергии в ядерных реакциях обусловлено изменением энергии взаимодействия нуклонов. Как вы уже знаете, между нуклонами действуют ядерные силы. Это силы *притяжения*. Чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны, необходимо совершить работу, то есть сообщить ядру некоторую энергию.

Энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называют *энергией связи ядра*.

Для нахождения энергии связи ядра используют соотношение между массой m тела и его полной энергией¹ E . Оно имеет вид

$$E = mc^2,$$

где c — скорость света. Это соотношение открыл А. Эйнштейн² в начале 20-го века. Из него следует, что когда энергия тела изменяется на ΔE , масса тела изменяется на

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Из-за наличия энергии связи масса ядра $M_{\text{я}}$ *меньше* суммы масс составляющих его нуклонов, поэтому точное измерение массы ядра позволяет определить энергию связи. Расчеты и опыты показывают, что выделение энергии в ядерных реакциях происходит тогда, когда энергия связи *увеличивается*.

Энергию связи, приходящуюся на один нуклон, называют *удельной энергией связи*. Таким образом, выделение энергии происходит в таких ядерных реакциях, в которых удельная энергия связи увеличивается.

¹ Имеется в виду энергия тела в системе отсчета, связанной с этим телом.

² Выдающийся физик 20-го века Альберт Эйнштейн (1879—1955) жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

Опыты показывают, что наибольшая удельная энергия связи у ядер с массовыми числами от 50 до 60 (ядро железа и ядра, близкие к нему по массовому числу). Поэтому при образовании из «тяжелых» ядер с большим массовым числом «средних» по массовому числу ядер удельная энергия связи увеличивается, а значит, *энергия выделяется*. Это и есть уже знакомые вам *реакции деления*.

Перейдем теперь к легким ядрам. Среди них наибольшая удельная энергия связи у ядер гелия (α -частиц). Она намного больше, чем у ядер дейтерия ${}^2_1\text{H}$ (это ядро изотопа водорода состоит из одного протона и одного нейтрона) и ядер трития ${}^3_1\text{H}$ (это ядро изотопа водорода состоит из одного протона и двух нейтронов).

Следовательно, при образовании ядра гелия из ядра дейтерия и ядра трития должна выделяться большая энергия. И, действительно, опыты показали, что в реакции



выделяется очень большая энергия. Как вы знаете, образование ядра с большей массой из менее массивных ядер называют реакцией синтеза. Именно с реакцией синтеза ученые связывают надежды на преодоление человечеством энергетического кризиса.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при их взаимодействии друг с другом или с другими частицами (в том числе, когда частицы испускаются ядрами).
- В ядерных реакциях сохраняются общее число нуклонов (массовое число) и электрический заряд (зарядовое число). Поэтому сумма верхних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции одинакова; сумма нижних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции также одинакова.
- Энергия, выделяющаяся при ядерной реакции, может в миллионы раз превосходить энергию, выделяющуюся в химических реакциях (для той же массы вещества).
- Реакциями деления называют реакции, в которых из «тяжелых» ядер с большим массовым числом образуются ядра «средние» по массовому числу. Примером реакции деления является деление ядра урана.

- Реакциями синтеза называют реакции, в которых из менее массивных ядер образуются более массивные. Реакции синтеза идут только при очень высоких температурах, поэтому их называют также термоядерными реакциями.
- Термоядерные реакции — основной источник энергии звезд.
- Цепной ядерной реакцией называют ядерную реакцию, в которой число делящихся ядер увеличивается со временем (атомный взрыв) или остается постоянным (управляемая ядерная реакция).
- Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называют ядерным реактором.
- Энергией связи ядра называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны. Энергию связи, приходящуюся на один нуклон, называют удельной энергией связи.
- Выделение энергии происходит в таких ядерных реакциях, в которых удельная энергия связи увеличивается.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Что представляют собой ядерные реакции? Приведите примеры ядерных реакций.
2. Сохраняются ли в ядерных реакциях электрический заряд и число нуклонов? Какой отсюда следует вывод для сумм верхних и нижних индексов в записи реакции?
3. Каковы отличия ядерных реакций от химических?
4. Что представляют собой реакции деления?
5. Что представляют собой реакции синтеза?
6. Какие ядерные реакции являются основным источником энергии звезд?
7. Что представляет собой цепная ядерная реакция? Нарисуйте схему цепной ядерной реакции. Какое свойство ядерной реакции деления делает цепную ядерную реакцию возможной?

8. Что происходит при лавинообразном увеличении числа делящихся ядер?
9. Каково главное свойство управляемой ядерной реакции? Как называют устройство, в котором осуществляют управляемую ядерную реакцию?

Второй уровень

10. Какая частица обозначена буквой X в приведенном ниже уравнении ядерной реакции: ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + X$?
11. Какая частица обозначена буквой X в приведенном ниже уравнении ядерной реакции: ${}^8_4\text{Be} + X \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$?
12. Что понимают под выделением энергии в ядерной реакции?
13. За счет чего увеличивается суммарная кинетическая энергия частиц и ядер в ходе ядерной реакции?
14. Что называют энергией связи ядра?
15. Какими силами обусловлена энергия связи нуклонов в атомном ядре?
16. Что называют удельной энергией связи ядра?
17. В результате ядерной реакции произошло выделение энергии. Увеличилась или уменьшилась при этом суммарная энергия связи ядер?
18. Почему с помощью нейтронов можно вызывать ядерные реакции деления?
19. Почему в реакциях деления происходит выделение энергии?
20. Почему в реакциях синтеза происходит выделение энергии?

§ 21. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

1. Атомная электростанция
2. Влияние радиации на живые организмы
- 3. Управляемый термоядерный синтез

1. АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Первая в мире атомная электростанция была построена в 1954 году под руководством И. В. Курчатова в г. Обнинске (Калужская область).



Сегодня атомные электростанции работают во многих развитых странах мира. Их доля в общем мировом производстве электроэнергии составляет около 15 %.

На рис. 21.1 схематически изображено устройство атомной электростанции.

В активной зоне реактора 1 находится ядерное топливо. Активная зона окружена отражателем 2 и толстой защитной оболочкой 3 из железобетона.

Реактором управляют с помощью регулирующих стержней 4. Они изготовлены из вещества, которое способно поглощать нейтроны. При запуске реактора эти стержни медленно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнется цепная ядерная реакция. А затем с помощью этих стержней поддерживается постоянство числа нейтронов, вызывающих деление ядер.

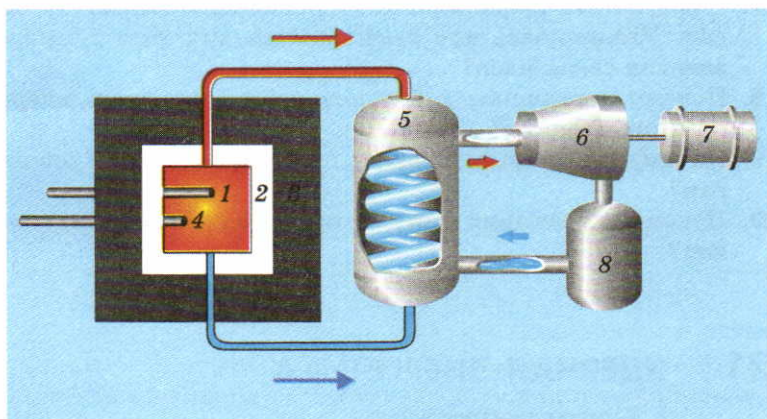


Рис. 21.1. Схема атомной электростанции

Тепло из горячей активной зоны реактора отводится теплоносителем¹. Теплоноситель передает тепло в парогенератор 5, превращая воду в пар под высоким давлением, и возвращает затем снова в активную зону. Пар вращает турбину 6, соеди-

¹ В качестве теплоносителя используют, например, воду.

ненную с генератором электроэнергии 7. Отработанный пар конденсируется в конденсаторе 8, откуда вода снова поступает в парогенератор.

Для работы атомной электростанции необходимо очень малое по массе количество топлива по сравнению с тепловой электростанцией. Кроме того, запасов ядерного топлива хватит на несколько столетий.

Нормально функционирующие атомные электростанции загрязняют окружающую среду меньше, чем тепловые. В частности, выброс радиоактивных веществ в атмосферу у атомной электростанции меньше, чем у тепловой, работающей на угле, так как уголь всегда содержит примеси радиоактивных веществ.

Главная проблема атомных электростанций — опасность аварий с выбросом больших количеств радиоактивных веществ в окружающую среду. В последние десятилетия 20-го века такие аварии произошли на нескольких атомных электростанциях. В настоящее время система обеспечения безопасности атомных электростанций значительно усовершенствована.

Радиоактивные отходы, образующиеся при работе атомных электростанций, помещают в толстостенные контейнеры из нержавеющей стали и погружают в глубокие шахты.

2. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Радиоактивное излучение вызывает *ионизацию атомов*, поэтому его называют *ионизирующим* излучением.

Опасность ионизирующего излучения состоит в том, что, когда нейтральный атом превращается в ион, его химическая активность резко изменяется. В живом организме, включающем чрезвычайно упорядоченные молекулярные структуры (биологические макромолекулы), изменение химической активности атомов нарушает жизнедеятельность. При интенсивном и продолжительном воздействии радиоактивного излучения на живой организм возникает *лучевая болезнь*.

Наибольшей проникающей способностью обладают рентгеновское и гамма-излучение: задержать их может только массивная свинцовая или бетонная преграда. Очень большая проникающая способность у нейтронов.

От потока электронов можно защититься слоем алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Наименьшая проникающая способность у потока α -частиц: он задерживается даже одеждой. Однако если α -излучение

все-таки попадает в организм (с пищей, вдыхаемым воздухом, через раны), оно наносит значительно больший вред по сравнению с γ -излучением той же энергии.

Воздействие радиоактивного излучения на организм характеризуют *поглощенной дозой излучения* D , которая равна отношению поглощенной телом энергии E к массе тела m :

$$D = \frac{E}{m}.$$

Единицей поглощенной дозы излучения в СИ является *грей* (Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Естественный радиационный фон обусловлен радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами. Такой фон составляет около 2 мГр в год на человека и не представляет опасности для человека.

Примерно половину общего вклада в естественный радиационный фон вносит радиоактивный инертный газ радон, а также продукты его распада, попадающие в организм при дыхании. Радон постоянно присутствует в земной атмосфере, так как он образуется при распаде урана и радия в недрах Земли и просачивается сквозь почву в атмосферу. Радиоактивный радон скапливается в плохо проветриваемых помещениях. Это еще одна причина, почему помещения надо проветривать.

Для специалистов, работающих с радиоактивным излучением, установлена предельно допустимая доза 50 мГр/год. Кратковременная же доза излучения, равная нескольким грей, может стать смертельной.

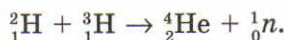
На практике используют также внесистемную единицу дозы излучения — рентген (Р). Один рентген равен примерно 0,01 Гр.



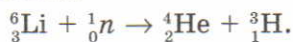
РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Самой перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза считают упомянутую выше реакцию синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития:



На Земле есть практически неисчерпаемые запасы дейтерия (он входит в состав воды морей и океанов), а тритий можно получать из лития (запасы лития также очень велики) при облучении его нейтронами:



Главная проблема управляемого термоядерного синтеза состоит, как мы уже говорили, в том, что он может происходить только при температуре в десятки миллионов градусов. Такую температуру можно создать в сильно ионизированном газе (его называют плазмой) с помощью мощных электрических разрядов.

Но в чем можно удержать столь горячую плазму в течение времени, достаточного для протекания реакции?

Принципиальное решение этой проблемы нашли советские физики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм: они предложили использовать для плазмы *магнитную ловушку*, в которой «стенками» для горячей плазмы служит магнитное поле, которому не страшна даже очень высокая температура. Именно на этот способ осуществления управляемой термоядерной реакции возлагают сегодня наибольшие надежды.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Первая в мире атомная электростанция была построена в СССР. Сегодня доля атомных электростанций в общем мировом производстве электроэнергии составляет около 15 %.
- Для работы атомной электростанции необходимо очень малое по массе количество топлива по сравнению с тепловой электростанцией. Запасов ядерного топлива хватит на несколько столетий.
- В настоящее время значительно усовершенствована система обеспечения безопасности атомных электростанций.
- Радиоактивное излучение опасно для живых организмов, потому что оно вызывает ионизацию атомов (поэтому его называют также ионизирующим излучением).
- Наибольшей проникающей способностью обладают рентгеновское и γ -излучение: задержать их может только массивная свинцовая или бетонная преграда. Большая проникающая способность у нейтронов.
- Наименьшая проникающая способность у потока α -частиц (задерживается даже одеждой).

- Воздействие радиоактивного излучения на организм характеризуют поглощенной дозой излучения D , которая равна отношению поглощенной телом энергии E к массе тела m , то есть $D = \frac{E}{m}$. Единицей измерения поглощенной дозы излучения в СИ является грей (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.
- Естественный радиационный фон обусловлен радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами. Такой фон составляет около 2 мГр в год на человека и не представляет опасности.
- Самой перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза считают реакцию синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития. Принципиальное решение осуществления управляемого термоядерного синтеза предложили А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. В какой стране была построена первая в мире атомная электростанция?
2. Опишите кратко устройство атомной электростанции.
3. Каковы основные преимущества и недостатки атомных электростанций?
4. Какой вид излучения обладает наибольшей проникающей способностью? Что может защитить человека от этого вида излучения?
5. Какой вид излучения обладает наименьшей проникающей способностью? Что может защитить человека от этого вида излучения? Чем опасен этот вид излучения?

Второй уровень

6. Какова роль регулирующих стержней в атомном реакторе?
7. Почему радиоактивное излучение опасно для организма?
8. Что представляет собой управляемый термоядерный синтез?
9. Чем характеризуют воздействие радиоактивного излучения на организм?

10. Что такое поглощенная доза излучения?

11. Что такое естественный радиоактивный фон? Представляет ли он опасность для человека?

§ 22. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

1. Планеты

2. Малые тела Солнечной системы

○ 3. Происхождение Солнечной системы

1. ПЛАНЕТЫ

В этом параграфе мы познакомимся с космическими телами, входящими в состав Солнечной системы. Знакомство с Солнцем — ближайшей к нам звездой — мы отложим до следующего параграфа, где расскажем о Солнце и других звездах.

В Солнечной системе 8 так называемых больших планет¹: *Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун* (планеты перечислены в порядке удаления от Солнца).

В таблице приведены округленные расстояния от Солнца до планет и радиусы планет.

Планета	Среднее расстояние от Солнца, млн км	Радиус, км
Меркурий	58	2400
Венера	110	6000
Земля	150	6400
Марс	230	3400
Юпитер	780	71 000
Сатурн	1400	60 000
Уран	2900	26 000
Нептун	4500	25 000

Расстояние от Земли до Солнца называют *астрономической единицей*.

¹ До начала 21-го века к числу больших планет относили и маленькую планету Плутон, находящуюся дальше Нептуна. В начале 21-го века было открыто несколько малых планет, находящихся дальше Плутона. Их (вместе с Плутоном) называли карликовыми планетами.

На рис. 22.1 изображены все планеты в одном масштабе.



Рис. 22.1. Планеты Солнечной системы

Мы видим, что четыре наиболее удаленные от Солнца планеты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — намного больше других. Поэтому их называют *планетами-гигантами*. А сравнительно близко расположенные к Солнцу планеты — Меркурий, Венеру, Землю и Марс — называют *планетами земной группы*.

Планеты каждой группы имеют общие особенности. Рассмотрим их подробнее.

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Общие свойства планет земной группы. Планеты земной группы имеют сравнительно небольшие размеры. У каждой из этих планет есть каменная оболочка — *литосфера*¹. Средняя плотность планет земной группы в несколько раз больше плотности воды.

Планеты земной группы бедны спутниками: большой спутник — Луна — есть только у Земли². У Марса два очень малых спутника (размером в несколько километров), а у Меркурия и Венеры спутников нет.

¹ От греч. «литос» — камень.

² Ученые предполагают, что Луна образовалась вследствие столкновения Земли с другой планетой на ранних этапах формирования Солнечной системы.

Меркурий. Самая ближняя к Солнцу планета — Меркурий — движется вокруг Солнца с самой большой среди планет скоростью. Из-за этого меркурианский год очень короток: один оборот вокруг Солнца Меркурий совершает за 88 земных суток. Но зато Меркурий очень медленно вращается вокруг своей оси: день и ночь на Меркурии длятся по целому меркурианскому году, то есть сутки на Меркурии в два раза длиннее года!

Обращенная к Солнцу часть поверхности Меркурия нагревается за долгий меркурианский день выше 400°C . Но затем «дневная» жара сменяется долгим и лютым «ночным» холодом: до -170°C .

Поверхность Меркурия изрыта кратерами от ударов космических тел-метеоритов (рис. 22.2). Такова была судьба всех планет: при подобных столкновениях на ранних этапах существования Солнечной системы планеты постепенно «набирали массу». На Меркурии кратеры от ударов сохранились благодаря отсутствию атмосферы.

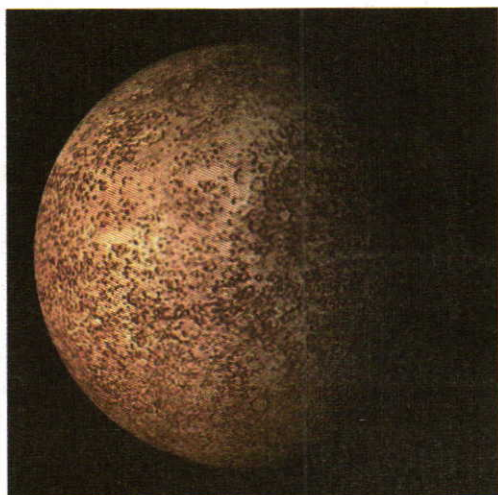


Рис. 22.2. Меркурий

Венера. Самую красивую планету назвали именем древнеримской богини любви. Из-за того что Венера находится ближе к Солнцу, чем Земля, ночью мы не можем видеть эту планету: ведь глядя ночью в небо, мы смотрим в сторону, противоположную Солнцу. Поэтому любоваться Венерой можно либо

перед восходом Солнца, либо сразу после захода. Из-за этого Венеру неточно (но зато красиво) называют также утренней и вечерней звездой.

В отличие от Меркурия *Венера обладает атмосферой*: ее обнаружили с помощью телескопов несколько ученых, в том числе М. В. Ломоносов.

Атмосфера у Венеры очень плотная: давление у поверхности Венеры в 90 раз больше, чем у поверхности Земли. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа.

Поверхность Венеры постоянно закрыта густыми облаками, состоящими из капелек серной кислоты (рис. 22.3, *а*). Поэтому изучить поверхность планеты удалось только с помощью запущенных к Венере космических аппаратов. На рис. 22.3, *б* представлено, какой виделась бы Венера, если бы у нее не было атмосферы.

Плотная атмосфера Венеры сохраняет полученное планетой от Солнца тепло (так называемый парниковый эффект). Поэтому вблизи поверхности Венеры температура около 450 °С.

Венера также подвергалась бомбардировке метеоритами, однако благодаря действию атмосферы следы ударов на поверхности этой планеты менее заметны.

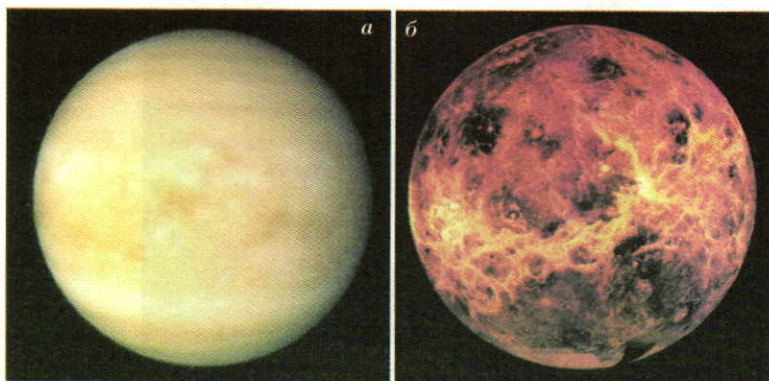


Рис. 22.3. Венера: *а* — вид в телескоп; *б* — вид Венеры без атмосферы (по фотографиям, сделанным с помощью космических аппаратов)

Земля и Луна. Земля — единственная планета Солнечной системы, большая часть поверхности которой покрыта водой (рис. 22.4).



Рис. 22.4. Вид Земли из космоса

Земля подвергалась такой же жестокой бомбардировке метеоритами, что и другие планеты, но за миллионы лет под действием дождей и ветров ударные кратеры сгладились. Однако кое-где следы больших кратеров еще остались (рис. 22.5).



Рис. 22.5. Метеоритный кратер в США диаметром 1,2 км

Луна движется вокруг Земли, вращаясь при этом вокруг своей оси, причем эти два вращения так согласованы, что *Луна всегда обращена к Земле одной стороной.*

Поверхность Луны изрыта огромными ударными кратерами (рис. 22.6). Они сохранились благодаря тому, что на Луне нет атмосферы.



Рис. 22.6. Луна

Марс. Эту планету называли именем древнеримского бога войны за ее красноватый оттенок, обусловленный оксидами железа в марсианской коре.

У Марса есть атмосфера, но давление вблизи поверхности этой планеты примерно в 150 раз меньше давления у поверхности Земли. Как и у Венеры, атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа.

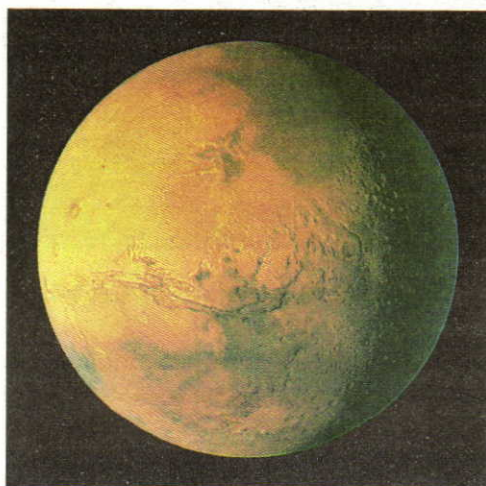


Рис. 22.7. Марс

Радиус Марса примерно вдвое меньше радиуса Земли, а масса меньше массы Земли примерно в 9 раз. На Марсе находится самая высокая гора Солнечной системы — вулкан Олимп высотой 27 км (это примерно в 3 раза выше самой высокой горы на Земле — Джомолунгмы).

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

Общие свойства планет-гигантов. Напомним, что *планетами-гигантами* называют *Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун*.

Масса любой из этих планет во много раз превосходит общую массу всех планет земной группы. Но в отличие от имеющих твердую оболочку планет земной группы, планеты-гиганты — это огромные *газовые шары*. Правда, из-за огромного сжатия, обусловленного силами тяготения, у них есть твердые ядра.

У всех планет-гигантов есть *спутники* (их десятки), причем некоторые из них больше Луны. Свойства спутников сходны со свойствами планет земной группы, в частности, многие из них имеют твердую оболочку.

Рассмотрим особенности двух самых больших планет-гигантов — Юпитера и Сатурна.

Юпитер. Масса Юпитера почти в 3 раза больше *общей* массы *всех* остальных планет. Не случайно «царя планет» назвали именем главного древнеримского бога.



Рис. 22.8. Юпитер. Темное пятно слева — тень от одного из спутников Юпитера

На поверхности Юпитера видны идущие вдоль его «параллелей» полосы (рис. 22.8). Они обусловлены большой скоростью вращения планеты: вблизи экватора газообразная «поверхность» Юпитера движется со скоростью более 40 000 км/ч.

У Юпитера около трех десятков спутников, поэтому он со своими спутниками напоминает Солнечную систему «в миниатюре». Это сходство усиливается тем, что Юпитер даже «греет», правда, несравненно меньше, чем Солнце.

Каков же источник энергии Юпитера? Энергия Юпитера выделяется за счет падения наружных слоев планеты к ее центру. Это означает, что сжатие Юпитера под действием сил тяготения продолжается до сих пор! Как мы увидим далее, подобное гравитационное сжатие «зажигает» звезды. Так что Юпитер является как бы несостоявшейся (из-за слишком «малой» массы) звездой.

Сатурн. Замечательная особенность Сатурна — роскошное кольцо, открытое еще Г. Галилеем (рис. 22.9). Оно не сплошное, а состоит из множества мелких космических тел.

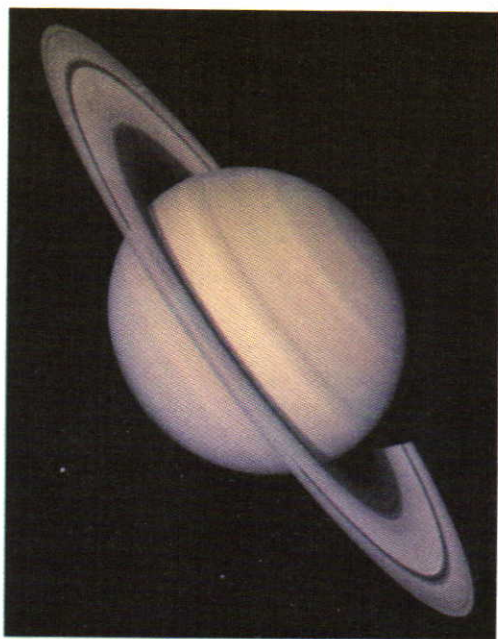


Рис. 22.9. Сатурн. На часть кольца (справа) падает тень планеты. Светлые точки внизу слева — спутники Сатурна

2. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Астероиды. Между орбитами Марса и Юпитера обращаются миллионы мелких планет и небольших космических тел неправильной формы. Их называли *астероидами*¹. Некоторые астероиды даже «обзавелись» крошечными спутниками (рис. 22.10).



Рис. 22.10. Астероид Ида длиной около 55 км со своим крошечным спутником (светлая точка в правой части снимка)

Ученые установили, что астероиды представляют собой зародыши несостоявшейся планеты, орбита которой могла бы находиться между орбитами Марса и Юпитера. Объединиться в одну большую планету астероидам помешал огромный Юпитер: его могучая сила тяготения разрывала любое крупное образование.

Кометы. Это небольшие космические тела, которые обращаются вокруг Солнца по очень вытянутым орбитам. Поэтому они оказываются в поле зрения земных наблюдателей только через определенные промежутки времени (исчисляемые иногда десятилетиями). Тело (ядро) кометы состоит из льда и замерзших газов. Самая примечательная особенность кометы — огромный «хвост», длина которого составляет порой десятки

¹ В переводе с греч. «звездopodobный».

миллионов километров (рис. 22.11). Хвост кометы образуется за счет испарения ядра кометы, когда она оказывается вблизи Солнца.



Рис. 22.11. Комета



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

3. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Наиболее правдоподобную гипотезу о происхождении Солнечной системы высказал немецкий ученый И. Кант, живший в 18-м веке. Большой вклад в изучение происхождения Солнечной системы внес советский ученый О. Ю. Шмидт.

Как считают ученые, Солнечная система образовалась примерно 4,6 млрд лет назад из вращающегося *протопланетного облака*, которое состояло в основном из водорода и гелия. Сжимаясь вследствие тяготения, это облако превратилось в диск, в центре которого образовалось Солнце, а на периферии — планеты. О том, почему Солнце зажглось, мы расскажем в следующем параграфе.

«Вспыхнув», Солнце стало нагревать ближайшие к нему части формирующейся планетной системы. В результате летучие водород и гелий из этой области почти полностью улетучились, переместившись на периферию Солнечной системы, где они образовали планеты-гиганты. В сравнительно же близости от Солнца остались в основном тугоплавкие вещества, из которых и состоят планеты земной группы.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- В Солнечной системе 8 так называемых «больших планет»: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (планеты перечислены в порядке удаления от Солнца).
- Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс; планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.
- Планеты земной группы имеют сравнительно небольшие размеры. Крупный спутник (Луна) есть только у Земли.
- У Меркурия нет атмосферы.
- У Венеры очень плотная атмосфера из углекислого газа. Давление у поверхности Венеры в 90 раз больше, чем давление у поверхности Земли. Вблизи поверхности Венеры температура около 450 °С.
- Луна движется вокруг Земли, вращаясь вокруг своей оси, при этом Луна всегда обращена к Земле одной стороной.
- У Марса есть атмосфера, но давление вблизи поверхности планеты примерно в 150 раз меньше давления у поверхности Земли. Атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа.
- Планеты-гиганты — огромные газовые шары с твердыми ядрами.
- У всех планет-гигантов много спутников, причем некоторые из них больше Луны.
- Между орбитами Марса и Юпитера обращаются миллионы мелких планет и небольших космических тел неправильной формы. Это — астероиды.

- Солнечная система образовалась 4,6 млрд лет назад из холодного газопылевого облака, состоящего в основном из водорода и гелия с небольшой примесью других веществ.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Чему примерно равен диаметр Земли?
2. Во сколько примерно раз Луна меньше Земли?
3. Чему примерно равно расстояние от Земли до Солнца?
4. Какие планеты находятся ближе к Солнцу, чем Земля?
5. Какие планеты находятся дальше от Солнца, чем Земля?
6. Назовите четыре самые большие планеты. Какое у них общее название?
7. Назовите планеты земной группы. Что общего у планет этой группы?
8. Каковы общие свойства планет-гигантов?
9. Из чего образовалась Солнечная система?

Второй уровень

10. Измерьте, на каком расстоянии от глаза нужно держать спичечную головку, чтобы при рассматривании одним глазом она закрывала полную Луну. Оцените, исходя из этого, размер Луны (для оценки примите расстояние от Земли до Луны равным 400 000 км).
11. Почему ударные кратеры на Меркурии сохранились лучше, чем на других планетах?
12. Каковы основные свойства Венеры? Почему температура на поверхности этой планеты так высока?
13. На Земле мало ударных кратеров. Значит ли это, что она не подвергалась интенсивной бомбардировке космическими телами?
14. Каковы основные свойства Марса?
15. Являются ли астероиды обломками разрушенной планеты?

1. Источник энергии звезд
 2. Расстояния до звезд
 3. Разнообразие звезд
 4. Судьбы звезд
 5. Галактики
 6. Происхождение Вселенной
 7. От Большого взрыва до человека
-

1. ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

Знакомиться со звездами мы начнем с самой близкой к нам звезды — Солнца.

Температура поверхности Солнца около 6000 градусов. При такой температуре все известные нам вещества превращаются в пар. А в центре Солнца температура достигает 16 миллионов градусов!

Несколько веков ученые пытались понять: за счет какой энергии Солнце расточает тепло так щедро и так долго?

Сначала предполагали, что Солнце «горит» в буквальном смысле слова, то есть источником его энергии являются химические реакции горения. Но расчеты показали, что при таком расходе энергии Солнце «сгорело» бы за несколько тысяч лет. А геологические исследования указывают на то, что Земля существует миллиарды лет. Не может же Солнце быть моложе Земли! Значит, источник солнечной энергии — не горение.

В середине 19-го века немецкий ученый Г. Гельмгольц предположил, что Солнце излучает энергию благодаря тому, что внешние слои Солнца продолжают «падать» к его центру (напомним, что именно таков источник энергии Юпитера). Расчеты показали, что, продолжая сжиматься вследствие тяготения, Солнце может быть таким же жарким и ярким, как сегодня, миллионы лет. Но геология упрямо настаивала на миллиардах лет!

Хотя идея Гельмгольца не объяснила происхождения энергии Солнца, она объяснила, почему оно *зажглось*! Огромное облако межзвездного газа, сжимаясь под действием гравитации, разогревается так, что температура в его центральной области повышается до миллионов градусов. И тогда

там «вспыхивают» термоядерные реакции. Так рождается звезда.

Когда были открыты ядерные реакции, физики установили, что

источником энергии Солнца и других звезд являются реакции термоядерного синтеза.

Расчеты и наблюдения показывают, что благодаря термоядерным реакциям Солнце будет светить с нынешней яркостью еще 5—6 млрд лет, то есть примерно столько же, сколько оно уже светит¹.

Почему Солнце не разлетается? Глядя на ласковое Солнце, трудно представить, что в его недрах постоянно происходит термоядерный взрыв чудовищной силы. Почему же Солнце не разлетается в огнедышащие клочья?

От «разлета» Солнце и другие звезды удерживает *гравитация*. Термоядерные реакции стремятся разорвать звезду, а гравитация — еще больше сжать. В результате размер звезды какое-то время (это могут быть *миллиарды лет!*) примерно сохраняется. О судьбах звезд мы расскажем далее.

2. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЕЗД

Расстояния до звезд впервые оценил И. Ньютон, задавшись вопросом: на каком расстоянии должно быть Солнце, чтобы оно казалось нам звездой средней яркости? И оказалось, что даже ближайшие звезды в *сотни тысяч раз* дальше от нас, чем Солнце!

Сегодня измерены расстояния до многих звезд. При этом выяснилось, что ближайшая к нам звезда, как ни странно, не видна невооруженным глазом: разглядеть ее можно только в хороший телескоп, потому что она светит очень слабо. Чуть дальше нее находится яркая звезда Альфа Центавра, но наблюдать ее можно только в Южном полушарии. Свет от этой звезды идет к нам около 4 лет, поэтому говорят, что звезда находится от нас на расстоянии *4 световых года*.

Световым годом называют расстояние, которое свет пролетает в вакууме за один год.

¹ Молодые люди, у которых вся жизнь впереди, иногда огорчаются, узнав, что Солнце не вечно. Но не печальтесь: вся история человечества — всего лишь мгновение по сравнению с миллиардами лет, которые у Солнца еще впереди!

Зная, что скорость света — около 300 000 км/с, нетрудно подсчитать, что световой год приблизительно равен 10^{13} км.

Сегодня астрономы с помощью телескопов изучают звезды, расстояния до которых исчисляются *миллионами* световых лет! А взрыв большой звезды может быть виден в телескоп даже на расстоянии в миллиарды световых лет.

? Самая яркая звезда нашего неба — Сириус. Расстояние до него — около 8,7 световых лет. Во сколько раз Сириус дальше от нас, чем Солнце?

3. РАЗНООБРАЗИЕ ЗВЕЗД

Разноцветные звезды. Когда мы смотрим на небо невооруженным глазом, все звезды кажутся нам светящимися белыми точками. Но при наблюдении в телескоп можно заметить, что звезды — *разноцветные*: среди них есть белые, голубоватые, желтые и даже красноватые.

Гиганты и карлики. Когда ученые научились измерять размеры звезд, выяснилось, что они отличаются в тысячи раз: среди звезд есть *гиганты* и *карлики*. Причем как гиганты, так и карлики могут быть разных цветов.

Звезда изменяет свой размер и цвет. Самым же интересным оказалось то, что *одна и та же звезда* изменяет свой цвет и размер в течение своей «жизни» — и даже не один раз! Например, через несколько миллиардов лет наше Солнце начнет «краснеть» и «раздуваться». Но на этом его изменения не закончатся: через какое-то время Солнце снова начнет «белеть» и уменьшится до размеров планеты.

Почему звезды отличаются размером и цветом, ученые поняли, изучив *эволюцию* звезд: от их рождения до гибели.

4. СУДЬБЫ ЗВЕЗД

Рождение звезды. Рождаются все звезды примерно одинаково: облако разреженного газа под действием гравитации сжимается и *нагревается*. Когда температура в центре облака достигает нескольких миллионов градусов, вспыхивают *термоядерные реакции синтеза* — водород превращается в гелий. Звезда начинает *светить*.

Как зависит время жизни звезды от ее массы? Жизнь звезды в значительной мере определяется ее массой.

Звезды сравнительно малой массы (намного меньше массы Солнца) расходуют свою энергию очень экономно. Температура их поверхности не превышает нескольких тысяч градусов, поэтому они выглядят красноватыми (раскалены только до красна). Такие звезды называют *красными карликами*. Продолжительность жизни красных карликов сравнима со временем существования Вселенной.

Звезды, масса которых примерно равна массе Солнца, горят ярче и светят желтоватым светом, поэтому их называют *желтыми карликами*. Один из желтых карликов нам особенно близок и дорог; как вы уже догадались, это — наше Солнце. Желтые карлики живут миллиарды лет и светят при этом достаточно ярко. Так что нам очень «повезло» с нашим Солнцем: только вблизи желтого карлика и могла зародиться жизнь!

Солнце огромно по сравнению с Землей (которая тоже кажется нам огромной), но все познается в сравнении: есть звезды — *белые и голубые гиганты*, масса которых в десятки раз больше массы нашего Солнца. Однако не стоит завидовать жителям планетных систем этих звезд-гигантов, потому что таких жителей нет: срок жизни звезд-гигантов так краток, что возле них не может зародиться жизнь.

Эти массивные звезды «сгорают» быстрее других, потому что чем больше масса звезды, тем выше температура, при которой протекают термоядерные реакции внутри звезды. Именно высокой температурой и объясняется белое и голубоватое свечение этих звезд-гигантов.

То, что мы *сегодня* видим эти молодые звезды (жизнь которых продолжается не миллиарды лет, а только миллионы), означает, что *процесс образования звезд продолжается*. Значит, «сотворение мира» еще не завершено!

Но заметьте: среди звезд, находящихся в «расцвете лет», нет ни красных гигантов, ни белых карликов. Это — уже «старые» звезды. О них мы сейчас и расскажем.

Звезда становится красным гигантом. Когда весь водород в центральной области звезды превратится в гелий, образуется *гелиевое ядро*. Но гелий представляет собой тоже «ядерное топливо»: при температуре выше ста миллионов градусов «включаются» термоядерные реакции, которые превращают гелий в углерод. А при еще более высокой температуре на-

чинаются и другие термоядерные реакции. В результате температура звезды повышается, давление увеличивается, и наружные слои звезды отбрасываются на большое расстояние от ядра. Температура наружных слоев при этом резко падает: звезда становится огромной и «холодной», то есть превращается в *красного гиганта*. Это поистине гиганты: радиус некоторых красных гигантов превышает радиус земной орбиты! Но масса красных гигантов невелика: они практически «пусты».

Красный гигант превращается в белого карлика. Однако когда-то приходит конец *всем* возможным ядерным реакциям, так как они могут продолжаться только до тех пор, пока энергия в них *выделяется*. «Золой» термоядерных реакций является железо, потому что энергия связи для ядер железа максимальна (см. § 20. *Ядерные реакции*). Внешние слои звезды, постепенно расширяясь, навсегда покидают ее, и на месте звезды остается лишенное источников энергии, но раскаленное добела «железное ядро» размером примерно с Землю. Это и есть *белый карлик*.

Конец жизни звезды. Звезды с массой, не сильно отличающейся от массы Солнца (а таких звезд — большинство), заканчивают свою жизнь сравнительно «мирно» — без взрывов. Образовавшийся из звезды белый карлик постепенно остывает, становясь в конце концов невидимой звездой. Но если вблизи белого карлика окажется другая звезда, более молодая, у них может начаться «совместная» жизнь с гигантскими «фейерверками». Об этом мы расскажем ниже.

Звезды, масса которых превышает массу Солнца более чем в полтора раза, превращаются в *нейтронные* звезды. Дело в том, что в ядрах этих звезд чудовищная сила тяготения «вдавливает» электроны в протоны, в результате чего образуются нейтроны. Звезда превращается как бы в колоссальное атомное ядро, состоящее только из нейтронов. Но и это еще не конец звезды!

Взрывы звезд. Если одна из двух близко расположенных звезд стала белым карликом, она может начать «перетягивать» на себя звездное вещество второй звезды — в основном водород. Он является замечательным термоядерным «горючим» и, «падая» на белый карлик, нагревается до температуры термоядерного «возгорания» и вспыхивает весь сразу. Это — так называемый взрыв *новой*.

Бывают и намного более мощные взрывы звезд. При образовании нейтронной звезды ее наружные слои, содержащие еще много водорода, начинают стремительно падать к центру. При ударе о ядро резко повышается температура и «вспыхивают» термоядерные реакции. При этом за очень короткое время светимость звезды возрастает в *миллиарды раз*. Это — так называемый взрыв *сверхновой*. При таком взрыве значительная часть звезды, а иногда и вся звезда, разлетается. Знаменитая «крабовидная туманность», хорошо различимая в телескоп (рис. 23.1), — след такого взрыва, который жители Земли наблюдали в 1054 году. В китайских и японских хрониках говорится, что звезда стала настолько яркой, что ее было видно даже днем! Она украшала небо около трех недель, а затем в течение года постепенно угасала.



Рис. 23.1. Крабовидная туманность — след взрыва сверхновой

5. ГАЛАКТИКИ

Галактика — Млечный Путь. В ясную безлунную ночь, особенно вдаль от города, хорошо заметна мягкая светящаяся полоса, опоясывающая все небо. Это — Млечный Путь¹ (рис. 23.2, а).

¹ Согласно одному из древнегреческих мифов эта светящаяся полоса — след пролитого молока.



Рис. 23.2. Млечный Путь: *а* — видимый невооруженным глазом; *б* — видимый в телескоп

Загадку Млечного Пути разгадал Г. Галилей, направив на него построенный им телескоп: оказалось, что Млечный Путь — это *колоссальное скопление звезд* (рис. 23.2, б).

Английский астроном У. Гершель доказал, что Млечный Путь — огромная звездная система, имеющая форму выпуклой линзы. Этой звездной системе, которую называли Галактикой¹, принадлежит и Солнце.

В Галактике, по разным оценкам, от 100 миллиардов до одного триллиона звезд. Диаметр Галактики около 100 000 световых лет, причем Солнце находится на расстоянии примерно 30 тыс. световых лет от центра Галактики.

Звезды Галактики вращаются вокруг ее центра, «повинуясь» силам всемирного тяготения. Например, Солнце совершает один оборот вокруг центра Галактики примерно за 200 млн лет, двигаясь со скоростью около 250 км/с (относительно центра Галактики).

Другие галактики. На ночном небе можно увидеть невооруженным глазом крошечное туманное пятнышко в созвездии Андромеды, которое называли туманность Андромеды.

¹ От греч. «галаксиас» — молочный.

При наблюдении в телескоп можно заметить структуру этой «туманности» (рис. 23.3).



Рис. 23.3. Галактика Андромеды

Сегодня доказано, что эта «туманность» такая же гигантская звездная система, как и наша Галактика, даже «немного» больше. Ее называли *галактикой Андромеды*. От нашей Галактики до галактики Андромеды около 2 млн световых лет.

Сегодня астрономы установили, что существуют *миллиарды* галактик. Нашу Галактику (ее пишут с *большой* буквы!) называют также Млечный путь.

Разбегание галактик и расширение Вселенной. Ученым удалось измерить скорости, с которыми галактики движутся по отношению к нам. Американский астроном Э. Хаббл заметил удивительно простую закономерность: оказалось, что

большинство галактик удаляются от нас, причем скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее.

Это соотношение называли *законом Хаббла*.

Из астрономических наблюдений следует, что примерно 13 млрд лет назад Вселенная была чрезвычайно мала по сравнению с ее нынешними размерами. С тех пор и до настоящего времени *Вселенная расширяется*. И поэтому наблюдателю, находящемуся в любом месте Вселенной, кажется, что галактики удаляются именно *от него!*

На возможность расширения Вселенной первым указал советский ученый А. А. Фридман.



РАЗВИТИЕ ТЕМЫ

6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Большой взрыв. Основываясь на наблюдениях о разбегании галактик, физик Джордж (Георгий Антонович) Гамов¹ предположил, что начало Вселенной напоминало колоссальный взрыв, который получил название *Большого взрыва*.

Согласно предложенной Гамовым модели горячей Вселенной в первые моменты после Большого взрыва вещество имело не только колоссальную плотность, но и чрезвычайно высокую *температуру*. Взаимодействия, обусловленные ядерными силами, привели к образованию ядер водорода и гелия. Когда температура упала до нескольких миллиардов градусов, Вселенная заполнилась электромагнитным излучением.

Расширяясь вместе со Вселенной, это излучение постепенно остывало. И в 1964 году такое «остывшее» излучение действительно было обнаружено! Это открытие считают подтверждением предложенной Гамовым модели рождения Вселенной.

Образование галактик. Через некоторое время электроны и ядра начали образовывать атомы — в основном простейшие: атомы водорода. Под действием сил тяготения из огромных облаков водорода начали формироваться зародыши галактик, а в них — зародыши звезд.

7. ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ЧЕЛОВЕКА

Физики и астрономы доказали, что наша Земля — всего лишь одна из нескольких планет, кружащихся вокруг одной

¹ Джорджа (Георгия Антоновича) Гамова трудно «приписать» какой-либо одной стране. Он родился в Одессе, учился и работал в Ленинграде, затем некоторое время работал в различных европейских странах, а с 1934 г. жил и работал в США.

из бесчисленных звезд, входящих в состав одной из бесчисленных галактик...

Однако живущий на «заурядной» планете человек смог заглянуть в невероятные глубины космоса и разгадать загадку происхождения Вселенной!

Вот уж, поистине: не место красит человека, а человек — место. Земля может гордиться своими обитателями! А мы должны беречь свою обитель...

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Источником энергии Солнца и других звезд являются реакции термоядерного синтеза.
- Расстояния до ближайших звезд исчисляются световыми годами.
- Световым годом называют расстояние, которое свет пролетает в вакууме за один год.
- Звезды отличаются друг от друга по размеру и цвету, причем одна звезда в течение своей «жизни» меняет свой размер и цвет.
- Рождаются звезды под действием сил гравитации: облако разреженного газа сжимается и нагревается. Когда температура в центре облака достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции синтеза. Через некоторое время (миллионы или миллиарды лет) звезда становится красным гигантом, а затем — белым карликом.
- Звезды могут взрываться: это так называемые взрывы «новых» и «сверхновых».
- Млечный Путь — огромная звездная система, имеющая форму выпуклой линзы. Этой звездной системе, которую называли Галактикой, принадлежит и Солнце. Диаметр Галактики около 100 000 световых лет, причем Солнце находится на расстоянии примерно 30 тыс. световых лет от центра Галактики.
- Сегодня астрономы установили, что существуют миллиарды галактик. Одна из ближайших к нам — галактика Андромеды: до нее около 2 млн световых лет.

- Американский астроном Э. Хаббл установил, что большинство галактик удаляются от нас, причем скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее (закон Хаббла).
- Вселенная расширяется: примерно 13 млрд лет назад все галактики начали разбегаться из очень малой области пространства. Начало Вселенной называют Большим взрыв.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Первый уровень

1. Какова примерно температура поверхности Солнца и температура в центре Солнца?
2. Каков источник энергии Солнца и других звезд?
3. Что такое световой год?
4. Как происходит рождение звезды?
5. Как зависит время жизни звезды от ее массы?
6. Что представляет собой Млечный Путь?
7. Каковы размеры и форма Галактики?

Второй уровень

8. Каковы были ранние гипотезы о происхождении энергии Солнца? Почему от них пришлось отказаться?
9. Какая гипотеза о происхождении энергии Солнца объяснила рождение звезд?
10. Как Ньютон оценил расстояния до звезд?
11. Как образуются красные гиганты?
12. Как образуются белые карлики?
13. Каково положение Солнца в Галактике?
14. Что представляет собой закон Хаббла? Какие выводы можно сделать из этого закона?
15. Каков примерно возраст Вселенной?
16. Что такое Большой взрыв?



- Атом является составным: он состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронов.
- Существование атомного ядра открыл на опыте английский физик Э. Резерфорд. Он предложил планетарную модель атома, согласно которой электроны движутся вокруг атомного ядра подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.
- Сплошные спектры излучения дают раскаленные твердые и жидкие тела.
- Линейчатые спектры излучают вещества в газообразном атомарном состоянии. У каждого химического элемента свой линейчатый спектр излучения, отличный от спектров других элементов. Это позволяет с высокой точностью определять химический состав вещества.
- Определение химического состава вещества по линейчатым спектрам излучения называют спектральным анализом.
- Непрерывный спектр излучения, на фоне которого видны темные линии, называют спектром поглощения. Для каждого элемента линейчатые спектры излучения и поглощения совпадают.
- Согласно предложенной Н. Бором теории атома электроны в атомах движутся только по определенным орбитам, называемым стационарными. Когда электрон находится на стационарной орбите, атом не излучает и не поглощает электромагнитное излучение. При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую атом излучает или поглощает электромагнитное излучение только определенной частоты.
- Ядра атомов состоят из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов. Заряд протона равен по модулю заряду электрона, а массы протона и нейтрона примерно равны.
- Протоны и нейтроны имеют общее название — нуклоны. Масса одного нуклона примерно в 2000 раз больше массы электрона.
- Число протонов в ядре называют зарядовым числом и обозначают Z . Электрический заряд ядра Ze .

- Зарядовое число ядра совпадает с номером соответствующего химического элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Зарядовым числом ядра атома определяются химические свойства элемента.
- Число нейтронов в ядре обозначают N . Величину $A = Z + N$, равную общему числу нуклонов в данном ядре, называют массовым числом. Масса ядра приблизительно равна произведению массового числа на массу одного нуклона.
- Ядро атома обозначают так же, как и соответствующий химический элемент, ставя перед ним вверху массовое число, а внизу — зарядовое число.
- Между нуклонами действуют очень большие силы притяжения, которые называют ядерными силами.
- Состав радиоактивного излучения: α -лучи (пучок ядер гелия ${}^4_2\text{He}$); β -лучи (пучок быстрых электронов); γ -лучи — пучок электромагнитного излучения очень большой энергии (γ -излучение).
- При испускании ядром α -частицы массовое число ядра уменьшается на 4, а зарядовое число ядра уменьшается на 2.
- При испускании ядром β -частицы (электрона) массовое число ядра остается неизменным, а зарядовое — увеличивается на 1.
- При γ -излучении ядро остается ядром того же химического элемента с тем же массовым числом.
- Периодом полураспада для данного изотопа называют промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа ядер.
- Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их друг с другом или с другими частицами (в том числе когда частицы испускаются ядрами).
- В ядерных реакциях сохраняются общее число нуклонов (массовое число) и электрический заряд (зарядовое число). Поэтому сумма верхних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции одинакова; сумма нижних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции также одинакова.
- Энергия, выделяющаяся в ядерной реакции, может в миллионы раз превосходить энергию, выделяющуюся в химических реакциях (для той же массы).

- Реакциями деления называют реакции, в которых из «тяжелых» ядер с большим массовым числом образуются ядра, «средние» по массовому числу. Примером реакции деления является деление ядра урана.
- Реакциями синтеза называют реакции, в которых из менее массивных ядер образуются более массивные ядра. Реакции синтеза идут только при очень высокой температуре, поэтому их называют также термоядерными реакциями.
- Термоядерные реакции — основной источник энергии звезд.
- Цепной ядерной реакцией называют ядерную реакцию, в которой число делящихся ядер увеличивается со временем или остается постоянным (управляемая ядерная реакция).
- Устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называют ядерным реактором.
- Энергией связи ядра называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны. Энергию связи, приходящуюся на один нуклон, называют удельной энергией связи.
- Выделение энергии происходит в таких ядерных реакциях, в которых удельная энергия связи увеличивается.
- Первая в мире атомная электростанция была построена в СССР. Сегодня доля атомных электростанций в общем мировом производстве электроэнергии составляет около 15 %.
- Для работы атомной электростанции необходимо очень малое по массе количество топлива по сравнению с тепловой электростанцией. Запасов ядерного топлива хватит на несколько столетий.
- В настоящее время значительно усовершенствована система обеспечения безопасности атомных электростанций.
- Радиоактивное излучение опасно для живых организмов, потому что оно вызывает ионизацию атомов (поэтому его называют также ионизирующим излучением).
- Наибольшей проникающей способностью обладают рентгеновское и гамма-излучение: задержать их может только массивная свинцовая или бетонная преграда. Велика также проникающая способность нейтронов.
- Наименьшая проникающая способность у потока α -частиц (задерживается даже одеждой).

- Воздействие радиоактивного излучения на организм характеризуют поглощенной дозой излучения D , которая равна отношению поглощенной телом энергии E к массе тела m , то есть $D = \frac{E}{m}$. Единицей измерения поглощенной дозы излучения в СИ является грей (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.
- Естественный радиационный фон обусловлен радиоактивностью окружающей среды и космическими лучами. Естественный радиационный фон составляет около 2 мГр в год на человека и не представляет опасности.
- Самой перспективной для осуществления управляемого термоядерного синтеза считают реакцию синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития. Принципиальное решение осуществления управляемого термоядерного синтеза предложили А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм.
- В Солнечной системе 8 так называемых больших планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (планеты перечислены в порядке удаления от Солнца).
- Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс; планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.
- Планеты земной группы имеют сравнительно небольшие размеры. Крупный спутник (Луна) есть только у Земли.
- У Меркурия нет атмосферы.
- У Венеры очень плотная атмосфера из углекислого газа. Давление у поверхности Венеры в 90 раз больше, чем давление у поверхности Земли. Вблизи поверхности Венеры температура около 450 °С.
- Луна движется вокруг Земли, вращаясь при этом вокруг своей оси так, что Луна всегда обращена к Земле одной стороной.
- У Марса есть атмосфера, но давление вблизи поверхности планеты примерно в 150 раз меньше давления у поверхности Земли. Атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа.
- Планеты-гиганты — огромные газовые шары с твердыми ядрами.
- У всех планет-гигантов много спутников, причем некоторые из них больше Луны.

- Между орбитами Марса и Юпитера обращаются миллионы мелких планет и небольших космических тел неправильной формы. Это — астероиды.
- Солнечная система образовалась 4,6 млрд лет назад из холодного газопылевого облака, состоящего в основном из водорода и гелия с небольшой примесью других веществ.
- Источником энергии Солнца и других звезд являются реакции термоядерного синтеза.
- Расстояния до ближайших звезд исчисляются световыми годами.
- Световым годом называют расстояние, которое свет пролетает в вакууме за один год.
- Звезды отличаются друг от друга по размеру и цвету, причем одна звезда в течение своей жизни изменяет свой размер и цвет.
- Рождаются звезды под действием сил гравитации: облако разреженного газа сжимается и нагревается. Когда температура в центре облака достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции синтеза. Через некоторое время (миллионы или миллиарды лет) звезда становится красным гигантом, а затем — белым карликом.
- Звезды могут взрываться: это так называемые взрывы новых и сверхновых.
- Млечный Путь — огромная звездная система, имеющая форму выпуклой линзы. Этой звездной системе, которую назвали Галактикой, принадлежит и Солнце. Диаметр Галактики около 100 000 световых лет, причем Солнце находится на расстоянии примерно 30 тыс. световых лет от центра Галактики.
- Сегодня астрономы установили, что существуют миллиарды галактик. Одна из ближайших к нам — галактика Андромеды: до нее около 2 млн световых лет.
- Американский астроном Э. Хаббл установил, что большинство галактик удаляются от нас, причем скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее (закон Хаббла).
- Вселенная расширяется: примерно 13 млрд лет назад все галактики начали разбегаться из очень малой области пространства. Начало Вселенной называют Большой взрыв.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ

1. ДАВЛЕНИЕ. ПЛАВАНИЕ ТЕЛ

ДАВЛЕНИЕ

Давлением p называют отношение модуля силы F , действующей на площадь S поверхности, к этой площади:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Единица давления — *паскаль* (Па): $1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Закон Паскаля: давление, производимое внешними силами на жидкость или газ, передается без изменения в каждую точку жидкости или газа.

На законе Паскаля основано действие *гидравлического пресса*. Выигрыш в силе при использовании гидравлического пресса:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1},$$

где F_1 — модуль малой силы, с которой давят на меньший поршень площадью S_1 , а F_2 — модуль большой силы, действующей со стороны большего поршня площадью S_2 .

Зависимость давления газа от температуры и объема. Давление газа увеличивается при уменьшении объема и при повышении температуры; давление газа уменьшается при увеличении объема и при понижении температуры.

Зависимость давления жидкости от глубины: $p = \rho gh$, где h — глубина, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения.

Закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах (с одной и той же жидкостью) поверхность жидкости находится на одном уровне (рис. 1).

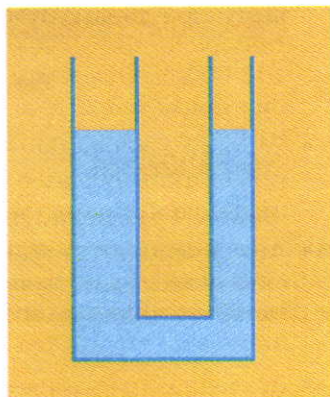


Рис. 1. Сообщающиеся сосуды

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Из-за притяжения к Земле атмосфера давит на поверхность Земли и на все тела, находящиеся у ее поверхности. Атмосферное давление на уровне моря примерно равно 100 кПа. Такое давление создает столб воды высотой 10 м или столб ртути высотой 760 мм.

С увеличением высоты давление атмосферы уменьшается.

Опыт Торричелли (рис. 2) объясняется существованием атмосферного давления: ртуть не выливается из трубки, потому что ее удерживает давление атмосферы на поверхность ртути в чаше.

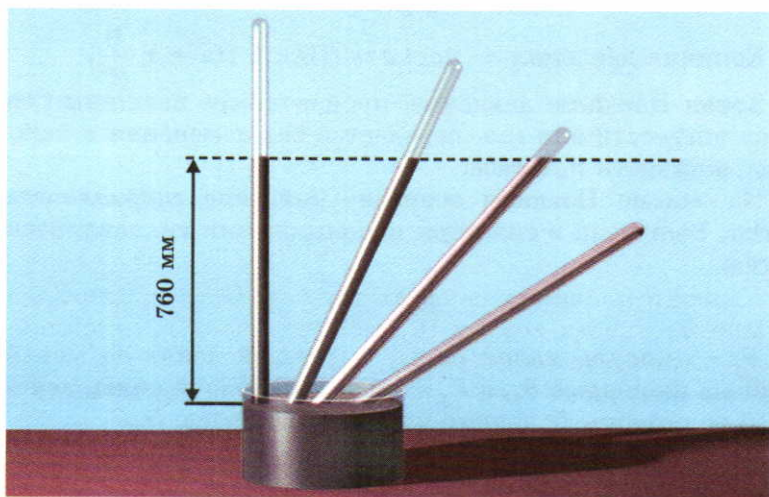


Рис. 2. Опыт Торричелли

ПЛАВАНИЕ ТЕЛ

Закон Архимеда. На тело, полностью или частично погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила (архимедова сила), равная по модулю весу жидкости или газа в объеме погруженной части тела:

$$F_A = \rho Vg,$$

где ρ — плотность жидкости или газа, V — объем погруженной части тела.

Архимедова сила — это равнодействующая сил давления жидкости или газа на все участки поверхности тела.

Условия плавания тел. Для плавающего тела архимедова сила и сила тяжести уравниваются друг друга, то есть равны по модулю и направлены противоположно (рис. 3).



Рис. 3. Условия плавания тел: архимедова сила уравнивает силу тяжести

Условия плавания однородных тел. Если плотность тела меньше плотности жидкости, то тело плавает, частично погружившись в жидкость (рис. 4, а);

если плотность тела равна плотности жидкости, то тело плавает, полностью погружившись в жидкость (рис. 4, б);

если плотность тела больше плотности жидкости, то тело тонет (рис. 4, в).

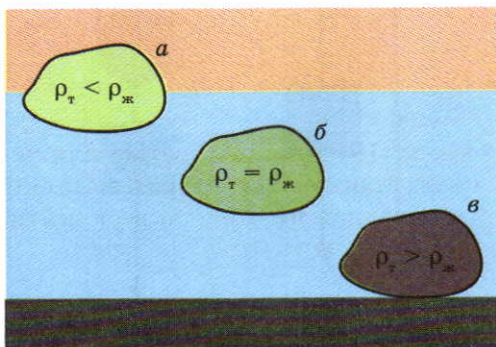


Рис. 4. Условия плавания тел

Воздухоплавание возможно благодаря тому, что закон Архимеда справедлив и для газов. Воздушные шары (и дирижабли) наполняют газом, плотность которого меньше плотности окружающего воздуха (теплым воздухом, водородом или гелием).

2. ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Простыми механизмами называют устройства, с помощью которых можно изменять модуль и направление силы.

Примеры простых механизмов: неподвижный и подвижный блоки, наклонная плоскость, рычаг.

БЛОКИ

С помощью *неподвижного блока* (рис. 5, а) можно только изменять направление действия силы. Он не дает выигрыша в силе.

Подвижный блок (рис. 5, б) дает выигрыш в силе в 2 раза, если можно пренебречь трением и массой блока. Но при его использовании в 2 раза проигрывают в пути.

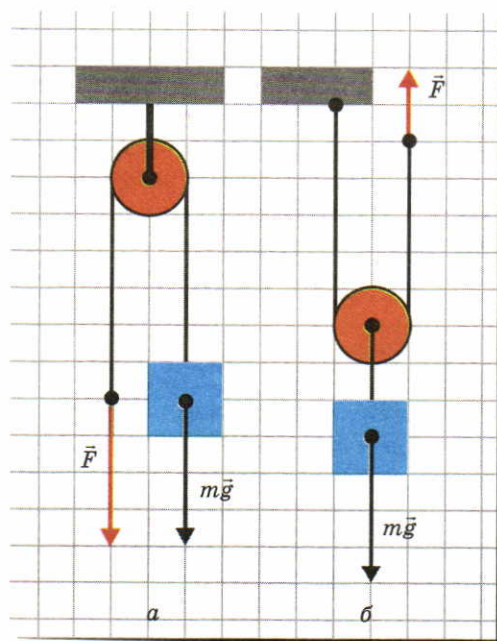


Рис. 5. Блоки: а — неподвижный; б — подвижный

Наклонная плоскость. При использовании наклонной плоскости мы выигрываем в силе во столько же раз, во сколько раз проигрываем в пути (если можно пренебречь трением).

РЫЧАГ

Рычагом называют твердое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной точки, которую называют *точкой опоры*.

Расстояние от точки опоры до линии действия силы называют *плечом силы* (обозначают l).

Условие равновесия рычага (рис. 6): рычаг находится в равновесии, если приложенные к рычагу силы стремятся вращать его в противоположных направлениях, причем модули сил обратно пропорциональны плечам сил:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

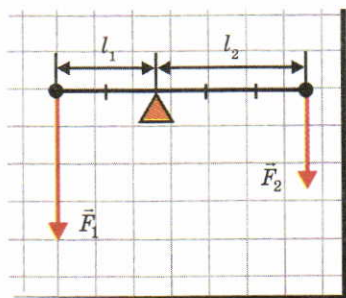


Рис. 6. К условию равновесия рычага

Правило моментов: рычаг находится в равновесии, если сумма моментов сил, стремящихся вращать рычаг в одном направлении, равна сумме моментов сил, стремящихся вращать его в противоположном направлении. *Моментом силы* называют произведение модуля силы на плечо силы.

«Золотое правило» механики: при использовании любого простого механизма мы выигрываем в силе во столько же раз, во сколько раз проигрываем в пути. Это справедливо при условии, что трением и массой самих механизмов можно пренебречь. «Золотое правило» механики справедливо и для гидравлического пресса.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЗМА

Отношение полезной работы $A_{\text{пол}}$ к совершенной $A_{\text{сов}}$, выраженное в процентах, называют *коэффициентом полезного действия* (КПД):

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{сов}}} \cdot 100 \, \%.$$

3. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Молекулы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействуют друг с другом.

Внутренняя энергия тела — сумма кинетической энергии хаотического движения и потенциальной энергии взаимодействия частиц, из которых состоит тело.

Внутренняя энергия тела изменяется при его нагревании, охлаждении, изменении агрегатного состояния и при химических реакциях.

Внутреннюю энергию тела можно изменить *двумя способами*: совершив *работу* или посредством *телопередачи* (без совершения работы).

Энергию, получаемую или отдаваемую телом при теплопередаче, называют *количеством теплоты*.

ВИДЫ ТЕЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопроводность обусловлена передачей энергии от одного тела к другому или от одних частей тела к другим в результате теплового движения и взаимодействия частиц. При теплопроводности не происходит переноса вещества.

Конвекция обусловлена переносом вещества. Конвекция происходит только в жидкостях и газах.

Излучение обусловлено электромагнитным излучением.

Количество теплоты в различных процессах

Процесс	Формула для количества теплоты	Обозначения
Нагревание: тело получает количество теплоты	$Q = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$	c — удельная теплоемкость вещества m — масса тела
Охлаждение: тело отдает количество теплоты	$Q = cm(t_{\text{н}} - t_{\text{к}})$	$t_{\text{н}}$ — начальная температура $t_{\text{к}}$ — конечная температура

Процесс	Формула для количества теплоты	Обозначения
Сгорание топлива: выделяется количество теплоты	$Q = qm$	q — удельная теплота сгорания топлива m — масса тела
Плавление: тело получает количество теплоты Кристаллизация: тело отдает количество теплоты	$Q = \lambda m$	λ — удельная теплота плавления
Парообразование: тело получает количество теплоты Конденсация: тело отдает количество теплоты	$Q = Lm$	L — удельная теплота парообразования

Уравнение теплового баланса. Если теплопередача происходит между двумя телами, то количество теплоты Q_1 , которое отдает более нагретое тело, равно количеству теплоты Q_2 , которое получает менее нагретое тело: $Q_1 = Q_2$.

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Это машины, в которых внутренняя энергия топлива частично превращается в механическую энергию. Примерами тепловых двигателей являются паровая турбина, реактивный двигатель, двигатель внутреннего сгорания.

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют выраженное в процентах отношение работы A , совершенной двигателем, к количеству теплоты Q , выделившемуся при сгорании топлива:

$$\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100 \, \%.$$

Коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100 %.

КПД современных двигателей внутреннего сгорания — 35—40 %. Таков же примерно КПД паровых турбин на тепловых электростанциях.

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Электрические заряды. Электрические взаимодействия обусловлены наличием у тел *электрических зарядов*. Существуют два рода электрических зарядов: *положительные* и *отрицательные*.

Единица заряда — *кулон* (Кл).

Тела, имеющие заряды разных родов (разноименно заряженные), притягиваются (рис. 7, а), а тела, имеющие заряды одного рода (одноименно заряженные), отталкиваются (рис. 7, б, в).

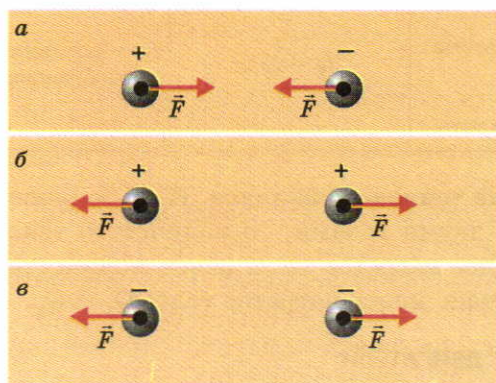


Рис. 7. Взаимодействие электрических зарядов

Носителями электрического заряда являются заряженные частицы — *электроны* и *ионы* (атомы, потерявшие или приобретшие один или несколько электронов). Отрицательный заряд тела обусловлен обычно избытком электронов, а положительный заряд — недостатком электронов.

Закон сохранения электрического заряда: в электрически изолированной системе тел алгебраическая сумма электрических зарядов тел остается неизменной.

Проводники и диэлектрики. Вещества, проводящие электрический заряд, называют *проводниками*. Проводниками являются все металлы.

Вещества, не проводящие электрический заряд, называют *диэлектриками*. Диэлектриками являются многие жидкости, пластмассы, газы.

Электрическое поле. Взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством электрического поля: каждое заряженное тело создает электрическое поле, которое действует на другие заряженные тела.

Электрическим напряжением между двумя точками называют отношение работы A , совершаемой электрическим полем при перемещении заряда q из одной точки в другую, к значению этого заряда:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Единица напряжения — вольт (В):

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электрический ток — это направленное движение заряженных частиц. За направление тока принимают направление движения *положительно* заряженных частиц.

Свободные электроны в металлах движутся в направлении, противоположном направлению тока, потому что электрон имеет отрицательный заряд.

Условия существования электрического тока:

- 1) наличие свободных зарядов;
- 2) наличие электрического поля.

Действия электрического тока: тепловое, световое, химическое, магнитное.

В *источнике тока* происходит разделение зарядов, вследствие чего один его полюс заряжается положительно, а другой — отрицательно. В гальванических источниках тока (батареях и аккумуляторах) разделение зарядов обусловлено химическими реакциями.

Основные части *электрической цепи*: источник тока, потребитель тока, соединительные провода, ключ.

Сила тока

$$I = \frac{q}{t},$$

где q — заряд, перенесенный через поперечное сечение проводника за промежуток времени t .

Единица силы тока — *ампер* (А).

Соотношение между единицами силы тока и заряда:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Силу тока измеряют амперметром. Амперметр включают *последовательно* с проводником, в котором измеряют силу тока.

Напряжение на участке цепи измеряют вольтметром. Вольтметр включают *параллельно* с проводником, на котором измеряют напряжение.

Закон Ома для участка цепи. Сила тока I в проводнике прямо пропорциональна напряжению U на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Единица сопротивления ом (Ом):

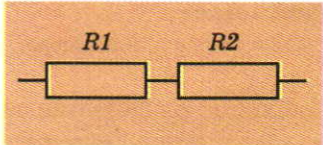
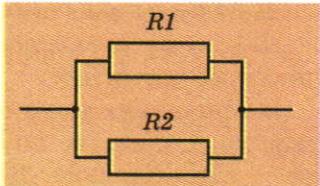
$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

Сопротивление провода

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l — длина провода, S — площадь его поперечного сечения, ρ — *удельное сопротивление* металла, из которого сделан провод.

Последовательное и параллельное соединения проводников

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Обозначение на схеме		
Общее сопротивление	$R = R_1 + R_2;$ при соединении n проводников $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$. Сопротивление всего участка цепи больше сопротивления любого из последовательно соединенных проводников	$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$ при соединении n проводников $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$ Сопротивление всего участка цепи меньше сопротивления любого из параллельно соединенных проводников

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Сила тока и напряжение	Сила тока в проводниках одинакова: $I = I_1 = I_2$. Напряжение больше на том проводнике (приборе), сопротивление которого больше	Напряжение на проводниках одинаково: $U = U_1 = U_2$. Сила тока больше в том проводнике, сопротивление которого меньше
При выключении одного из приборов	Цепь размыкается, вследствие чего перестают действовать все приборы	Цепь не размыкается, поэтому остальные приборы продолжают действовать

В быту и в технике обычно используют параллельное соединение электрических приборов, потому что в этом случае любой прибор можно включать и выключать независимо от остальных и все приборы можно рассчитывать на одно и то же напряжение.

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА

Работа тока за время t на участке цепи $A = UIt$, где U — напряжение на концах участка, I — сила тока в цепи.

Закон Джоуля — Ленца. Количество теплоты, выделившееся за время t в проводнике $Q = I^2Rt$, где I — сила тока в цепи, R — сопротивление участка цепи.

Мощность тока на участке цепи $P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2R$, где U — напряжение на концах участка, I — сила тока в цепи, R — сопротивление участка цепи.

При последовательном соединении проводников удобнее использовать формулу $P = I^2R$, потому что при этом сила тока в проводниках одинакова, а при параллельном соединении удобнее пользоваться формулой $P = \frac{U^2}{R}$, потому что при этом на проводниках одинаковое напряжение.

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Главное свойство полупроводников — значительное изменение электрического сопротивления при изменении внешних условий, например температуры и освещенности. Это свойство полупроводников используют для создания автоматических устройств.

Электрические свойства полупроводников сильно зависят от примесей. Это используют для создания транзисторов — приборов, которые усиливают электрические сигналы.

МАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Одноименные полюса магнитов отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Северным полюсом магнитной стрелки называют тот, который указывает на север. Земля является большим магнитом. Вблизи Северного (географического) полюса Земли находится ее южный магнитный полюс, а вблизи ее Южного (географического) полюса находится северный магнитный полюс.

Опыт Эрстеда. Проводник с током действует на расположенную вблизи него магнитную стрелку (рис. 8).

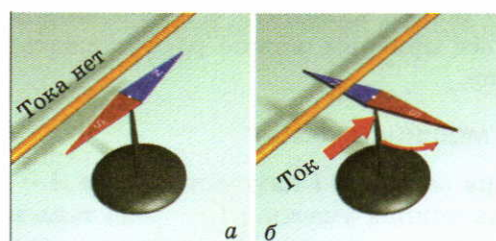


Рис. 8. Действие проводника с током на магнитную стрелку: *а* — тока в проводнике нет; *б* — в проводнике течет ток

Взаимодействие параллельных проводников, по которым текут токи. Если токи текут в одном направлении, то проводники притягиваются (рис. 9, *а*), а если в противоположных направлениях, то отталкиваются (рис. 9, *б*).

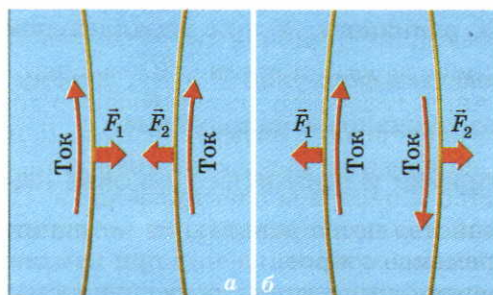


Рис. 9. Взаимодействие параллельных проводников, по которым текут токи

Магнитное действие тока используют в наушниках, громкоговорителях, электроизмерительных приборах, электродвигателях.

Катушка с током обладает магнитными свойствами. Магнитные свойства катушки с током усиливаются, если внутрь катушки поместить стальной сердечник (такую катушку называют *электромагнитом*). С помощью мощных электромагнитов поднимают массивные стальные и железные детали, отделяют стальной и железный лом от других предметов.

Правило правой руки для определения северного магнитного полюса катушки с током: если мысленно обхватить катушку с током правой рукой так, чтобы четыре пальца указывали направление тока, то отогнутый под прямым углом большой палец укажет, где находится северный магнитный полюс (рис. 10).

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством *магнитного поля*: проводник с током создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на другие проводники с токами.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Электромагнитная индукция. При изменении числа магнитных линий, пронизывающих проволочную катушку (виток), в ней возникает индукционный ток. Явление электромагнитной индукции открыл М. Фарадей.

Правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, вызвавшей этот ток.

Индукционный генератор электрического тока преобразует механическую энергию в электрическую. Действие генератора основано на явлении электромагнитной индукции.

Производство и передача электроэнергии. Индукционные генераторы тока являются основными источниками электроэнергии в современном мире.

Электроэнергию производят в основном на тепловых и атомных электростанциях, а также на гидроэлектростанциях.

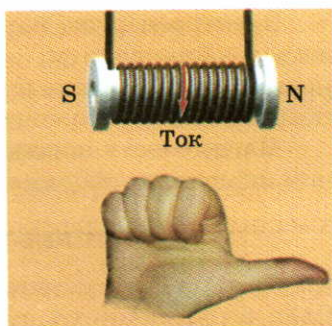


Рис. 10. Правило правой руки для определения северного магнитного полюса катушки с током

Электроэнергию на большие расстояния передают под высоким напряжением: это позволяет значительно уменьшить потери на нагревание проводов. Перед подачей электроэнергии потребителю напряжение в целях безопасности понижают.

Напряжение переменного тока повышают и понижают с помощью *трансформаторов*.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Теорию электромагнитного поля построил Дж. Максвелл. Одно из важнейших предсказаний этой теории — существование *электромагнитных волн*. Скорость электромагнитных волн оказалась равной скорости света, поэтому Максвелл предположил, что свет — это электромагнитные волны. Это предположение подтвердилось на опыте.

Основные принципы радиосвязи: с помощью микрофона звуковые колебания преобразуются в электрические; с помощью электрических колебаний модулируют электромагнитную волну высокой частоты; модулированная волна, попав на приемную антенну радиоприемника или мобильного телефона, порождает в ней модулированные высокочастотные электрические колебания; из этих колебаний с помощью детектирования выделяют электрические колебания звуковой частоты.

Электромагнитные колебания высокой частоты создают с помощью *генератора электромагнитных колебаний*. Основной его элемент — *колебательный контур*, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора. При электромагнитных колебаниях в колебательном контуре происходят периодические превращения энергии: энергия электрического поля в конденсаторе превращается в энергию магнитного поля в катушке, а затем энергия магнитного поля в катушке снова превращается в энергию электрического поля в конденсаторе.

5. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

СВОЙСТВА СВЕТА. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

Свет представляет собой электромагнитные волны. Скорость света в вакууме равна примерно 300 000 км/с.

Действия света: освещение, нагревание, химическое, электрическое.

Источники света. *Тепловыми источниками* света являются тела, нагретые до достаточно высокой температуры. *Холодные источники света* — тела, которые светятся при темпе-

ратуре, близкой к комнатной (дисплей мобильного телефона, светящиеся живые организмы).

Точечный источник света — физическая модель источника света, размерами которого в данных условиях можно пренебречь. Примерами точечных источников света для нас являются звезды (кроме Солнца).

Распространение света. В вакууме и в однородной среде свет распространяется *прямолинейно*. Физической моделью узкого пучка света является *луч света* — линия, вдоль которой распространяется свет.

При освещении предмета точечным источником света образуется резкая тень, а при освещении протяженным источником света — тень и полутень.

Солнечное затмение наступает тогда, когда Луна оказывается между Солнцем и Землей, в результате чего тень Луны падает на поверхность Земли. **Лунное затмение** наступает тогда, когда Луна попадает в тень Земли.

ЗЕРКАЛО

ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

Законы отражения света: 1) отраженный от зеркала луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к зеркалу, проведенным в точку падения луча; 2) при отражении от зеркала угол отражения β равен углу падения α (рис. 11).

Углы падения и отражения лучей отсчитывают от *перпендикуляра* к зеркалу.

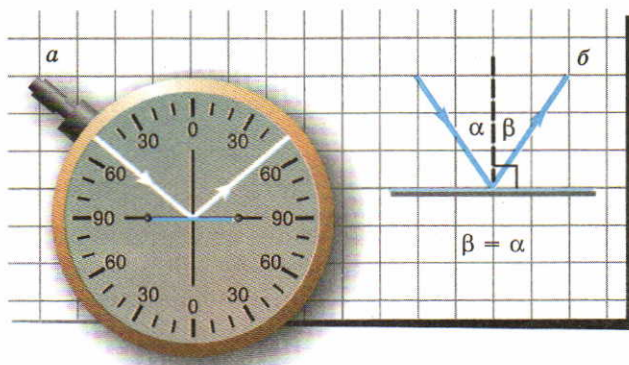


Рис. 11. Угол отражения равен углу падения

От шероховатой поверхности свет отражается *диффузно* (рассеянно). Большинство окружающих нас предметов мы видим потому, что они отражают свет диффузно.

Изображение в зеркале. Изображение предметов в зеркале является *мнимым*. Мнимое изображение точки образовано пересечением продолжений лучей (рис. 12).

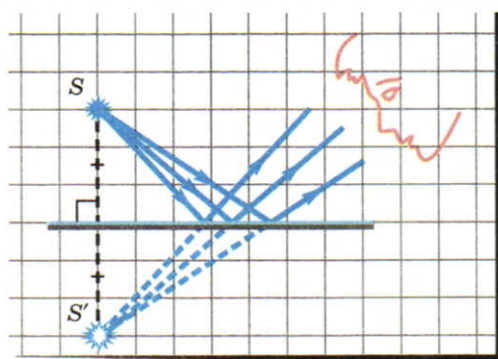


Рис. 12. Образование изображения точки в зеркале

Даваемое зеркалом изображение предмета находится на таком же расстоянии от зеркала, что и сам предмет, а размер изображения предмета равен размеру самого предмета (рис. 13).

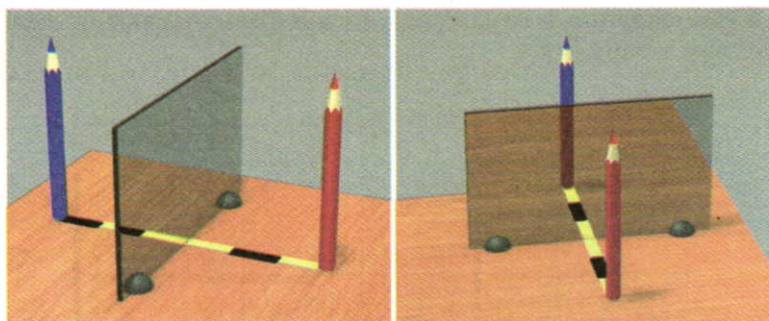


Рис. 13. Сравнение предмета с его изображением в зеркале

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Преломлением света называют изменение направления лучей света при переходе из одной прозрачной среды в дру-

гую. Преломление света обусловлено тем, что скорость света в различных средах различна.

Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча.

При переходе из воздуха в стекло угол преломления *меньше* угла падения (рис. 14, а), а при переходе из стекла в воздух угол преломления *больше* угла падения (рис. 14, б).

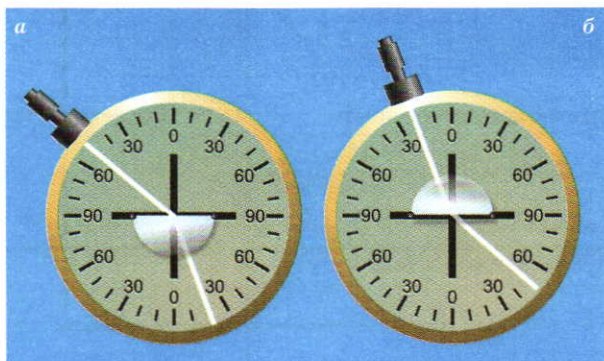


Рис. 14. Преломление света при переходе из воздуха в стекло (а) и при переходе из стекла в воздух (б)

ЛИНЗЫ

Собирающая и рассеивающая линзы. Параллельный пучок лучей после преломления в собирающей линзе становится сходящимся, а после преломления в рассеивающей линзе — расходящимся. Собирающие стеклянные линзы — выпуклые, а рассеивающие — вогнутые.

Различные виды линз схематически изображены на рис. 15.

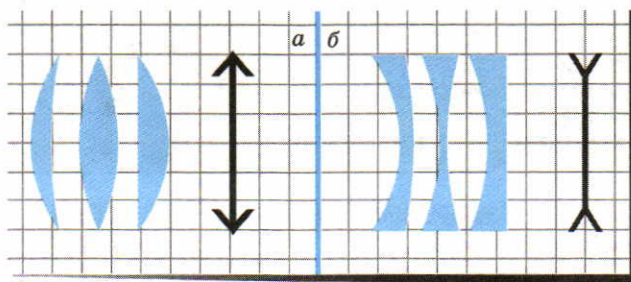


Рис. 15. Линзы в разрезе и их условные обозначения: а — собирающие (выпуклые) линзы; б — рассеивающие (вогнутые) линзы

ЭЛЕМЕНТЫ ЛИНЗЫ

Основные элементы линзы обозначены на рис. 16.



Рис. 16. Основные элементы линзы: *a* — собирающая (выпуклая) линза; *б* — рассеивающая (вогнутая) линза

Фокусы линзы. *Фокусом* собирающей линзы называют точку, в которой после преломления в линзе пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси (рис. 17, *a*).

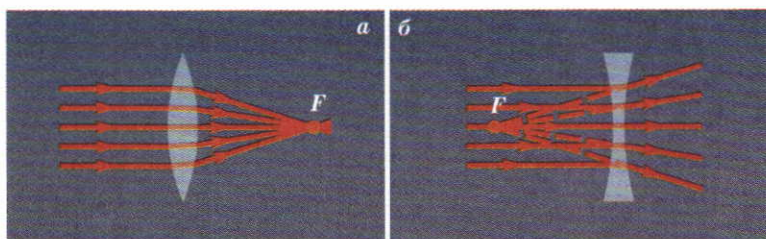


Рис. 17. Ход параллельных лучей, падающих на: *a* — собирающую линзу; *б* — рассеивающую линзу

Фокусом рассеивающей линзы называют точку, в которой пересекаются продолжения преломленных в линзе лучей,

падающих на линзу параллельно главной оптической оси (рис. 17, б). Фокус рассеивающей линзы считают мнимым, поскольку в нем пересекаются не сами лучи, а их продолжения.

У любой линзы есть два фокуса, расположенные на равных расстояниях от линзы по разные стороны от нее.

Расстояние от плоскости линзы до ее фокуса называют *фокусным расстоянием* линзы.

Изображение в линзе. Для построения даваемого линзой изображения точки обычно используют ход двух лучей:

1) *луч, идущий через оптический центр линзы.* Он не изменяет своего направления (рис. 18, а, б);

2) *луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси.* После преломления в собирающей линзе он проходит через ее фокус (рис. 18, в), а после преломления в рассеивающей линзе идет так, что его продолжение проходит через фокус линзы (рис. 18, г).

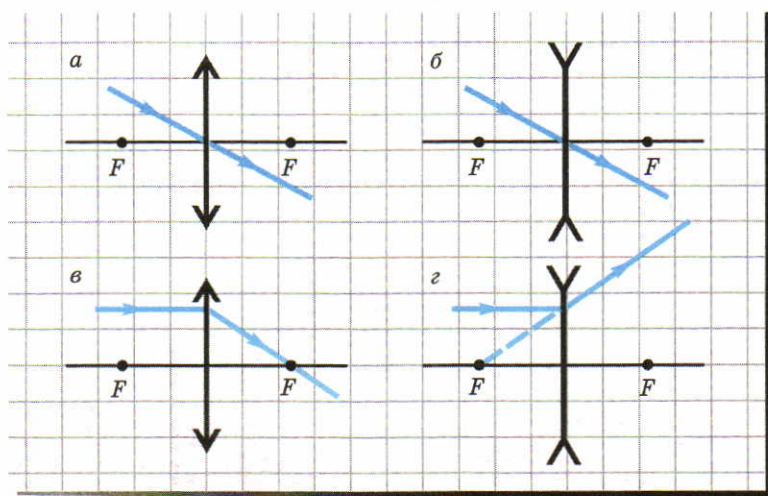


Рис. 18. Лучи, используемые для построения изображений в линзах

Изображения предметов, даваемые *собирающей* линзой:

если предмет находится дальше двойного фокусного расстояния, то его изображение будет действительным перевернутым и уменьшенным (рис. 19, а). Действительное изображение образуется пересечением самих лучей;

если предмет находится между двойным фокусным и фокусным расстоянием, то его изображение будет действительным перевернутым и увеличенным (рис. 19, а);

если предмет находится на фокусном расстоянии, то линза не дает изображения предмета, потому что лучи, исходящие из любой точки предмета, после преломления в линзе идут параллельно (рис. 19, б);

если предмет находится ближе фокусного расстояния, то его изображение будет мнимым прямым и увеличенным (рис. 19, в).

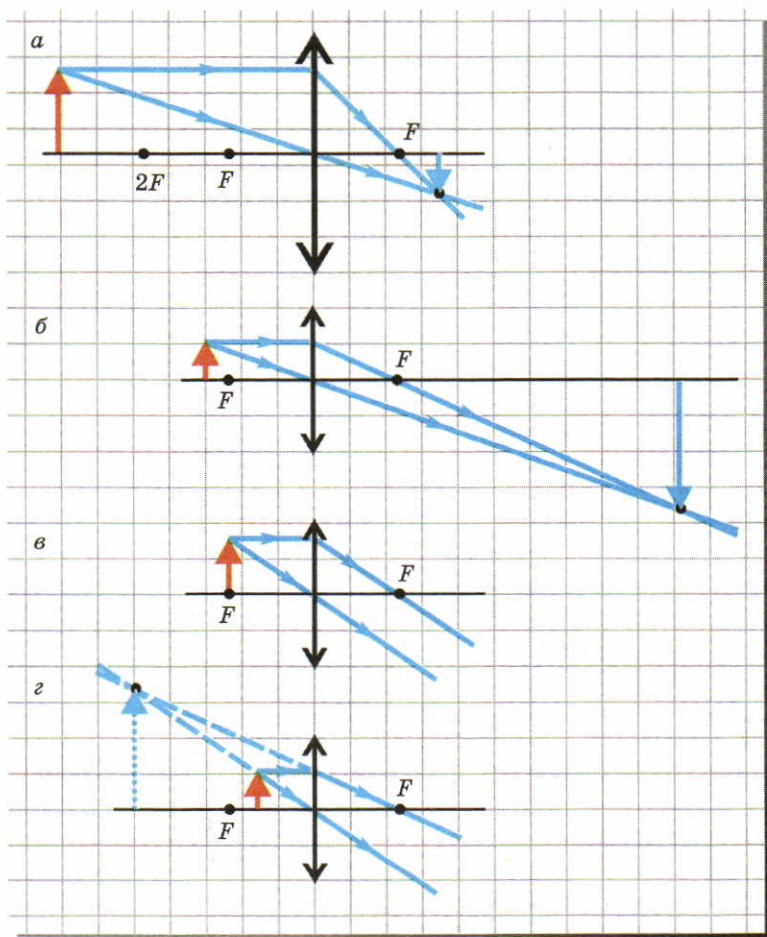


Рис. 19. Изображения, даваемые собирающей линзой

Рассеивающая линза дает мнимое прямое и уменьшенное изображение предмета при любом расстоянии от предмета до линзы (рис. 20).

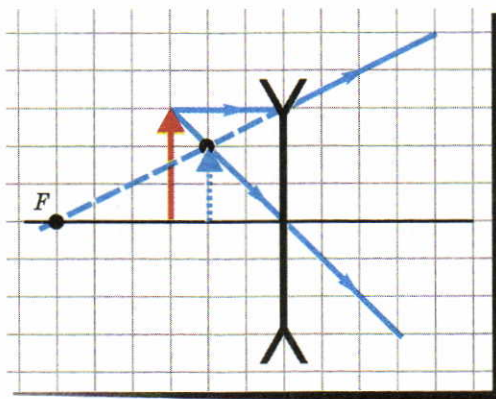


Рис. 20. Изображение, даваемое рассеивающей линзой

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}.$$

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ГЛАЗ

В фотоаппарате и видеокамере объектив (собирающая линза) дает действительное уменьшенное изображение предметов на светочувствительной поверхности (фотопленке или фотоэлементе). Строение глаза сходно с устройством фотоаппарата: действительное уменьшенное изображение предметов на сетчатке создается роговицей и хрусталиком, которые действуют как собирающая линза.

Расстояние наилучшего зрения для человека без дефектов зрения — примерно 25 см.

В случае *дальнозоркости* человеку трудно рассмотреть близкие предметы. Этот недостаток зрения исправляют с помощью очков с *собирающими* линзами.

В случае *близорукости* человек плохо видит удаленные предметы. Этот недостаток зрения исправляют с помощью очков с *рассеивающими* линзами.

Киноаппарат и проектор дают на экране действительное перевернутое изображение ярко освещенного маленького кадра.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

При прохождении сквозь треугольную стеклянную призму пучок белого света разлагается в спектр, содержащий все цвета радуги: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый (рис. 21). Это означает, что *белый свет является составным*, то есть смесью всех цветов радуги.

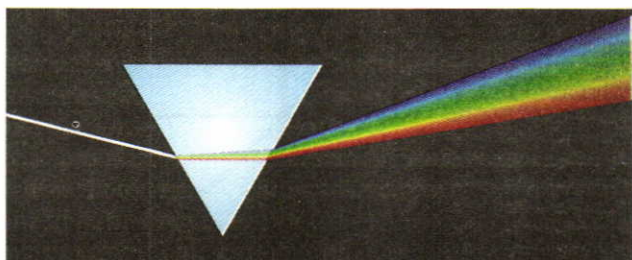


Рис. 21. Дисперсия света

Разложение белого света в цветной спектр называют *дисперсией* цвета. Дисперсия обусловлена тем, что лучи разных цветов преломляются в прозрачной среде (например, в стекле) по-разному.

Различная окраска предметов при освещении их белым светом обусловлена тем, что предметы по-разному отражают и поглощают лучи различных цветов. Например, красная роза отражает в основном лучи красного цвета, а зеленый лист — зеленого.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ¹

1. ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: научиться определять тип движения и измерять скорость прямолинейного равномерного движения (изучают движение пузырька воздуха в наклонной трубке с водой).

Оборудование: стеклянная трубка (почти заполненная водой и закрытая с обоих концов), линейка, часы электронные или секундомер.

Ход работы

1. Положите трубку одним концом на стол, а другим — на книгу, лежащую на столе. Убедитесь, что находящийся в трубке пузырек воздуха медленно перемещается к ее верхнему концу.

2. Положите вдоль трубки линейку.

3. Для проведения измерений верните пузырек воздуха в начальное положение. Для этого приподнимите опирающийся на стол конец трубки.

4. Положите конец трубки снова на стол и в тот же момент включите секундомер. Измерьте промежуток времени, за который пузырек воздуха переместится по трубке на 5 см.

5. Повторив пункты 3 и 4, измерьте промежутки времени, за которые пузырек пройдет 10, 15 и 20 см.

6. Занесите результаты измерений в таблицу:

№ опыта	Путь, см	Время, с	Средняя скорость, см/с

7. Вычислите средние скорости движения пузырька для каждого из проведенных опытов. Результаты вычислений занесите в таблицу.

¹ В состав учебно-методического комплекта «Физика—9» входит тетрадь для лабораторных работ, пользуясь которой, вам будет удобнее выполнять работы и делать записи. Некоторые лабораторные работы (по предложению учителя) можно делать дома. Время проведения лабораторной работы определяется учителем.

8. Сравните значения средней скорости при разных значениях пройденного пути. На основании этого сделайте вывод: можно ли считать движение пузырька прямолинейным равномерным; запишите ваш вывод в тетрадь. Если движение пузырька можно считать равномерным, укажите его скорость. Если движение пузырька не является равномерным, укажите, увеличивалась или уменьшалась средняя скорость движения по мере увеличения пройденного пути.

9. Дополнительное задание (по предложению учителя). Повторите все измерения, увеличив угол наклона трубки (подложив 2—3 книги вместо одной). Сделайте вывод: как изменился характер движения пузырька вследствие изменения угла наклона трубки? Запишите сделанный вывод в тетрадь.

2. ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: научиться определять, является ли прямолинейное движение тела равноускоренным, и измерять ускорение тела при таком движении (изучают движение шарика по наклонному желобу и измеряют ускорение шарика).

Оборудование: желоб, шарик, линейка длиной 1 м или сантиметровая лента, секундомер.

Ход работы

1. Положите желоб одним концом на стол, а другой конец чуть приподнимите (можно подложить 1—2 тетради). Изменяя угол наклона, добейтесь, чтобы шарик скатывался по всему желобу за время, не меньшее 3 с.

2. Положите вдоль желоба линейку или сантиметровую ленту.

3. Отпустив шарик без начальной скорости, измерьте путь l_1 , пройденный шариком за 1 с. Для увеличения точности повторите опыт 3 раза и возьмите среднее арифметическое значение пройденного пути.

4. Аналогичным образом измерьте пути l_2 и l_3 , пройденные шариком за 2 с и 3 с движения.

5. Занесите результаты измерений в таблицу:

№ опыта	l_1 , см	$l_{1 \text{ средн'}}$, см	l_2 , см	$l_{2 \text{ средн'}}$, см	l_3 , см	$l_{3 \text{ средн'}}$, см

6. При прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости пройденный путь прямо пропорционален квадрату времени движения (см. § 7. *Скорость и путь при прямолинейном равноускоренном движении*). В частности, должны выполняться соотношения $l_2 = 4l_1$ и $l_3 = 9l_1$. Проверьте, выполняются ли эти соотношения для полученных вами на опыте средних значений пройденного пути. Исходя из этого, сделайте вывод, можно ли считать движение шарика прямолинейным равноускоренным, и запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

7. Найдите ускорение шарика, используя формулу

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

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОТ МАССЫ ТЕЛА

Цель работы: исследовать зависимость силы тяжести от массы тела.

Оборудование: динамометр, набор гирь массой по 100 г, тело неизвестной массы.

Ход работы

1. Подвешивая к динамометру поочередно гири общей массой 100, 200, 300 и 400 г, определите силу тяжести, действующую на гирлянду гирь, в каждом случае. Для этого воспользуйтесь тем, что если подвешенное к динамометру тело покоится, динамометр показывает модуль силы тяжести F_T . Занесите результаты измерений в таблицу:

№ опыта	m , кг	F_T , Н	$\frac{F_T}{m}$, Н/кг

2. По данным каждого измерения найдите соотношение $\frac{F_T}{m}$ и занесите в таблицу. Сравните полученные значения этого соотношения, сделайте из этого сравнения вывод и запишите в тетрадь.

3. Начертите в тетради систему координат для построения графика зависимости силы тяжести, действующей на тело,

от массы этого тела. Выберите удобный масштаб и поставьте точки, соответствующие результатам ваших измерений. Проведите через начало координат отрезок прямой, проходящий близко к каждой из поставленных вами точек. Эта прямая является графиком зависимости силы тяжести, действующей на тело, от массы этого тела.

4. Измерьте динамометром силу тяжести, действующую на тело неизвестной массы. Пользуясь построенным графиком, определите массу этого тела.

4. СЛОЖЕНИЕ СИЛ, НАПРАВЛЕННЫХ ВДОЛЬ ОДНОЙ ПРЯМОЙ И ПОД УГЛОМ¹

Цель работы: научиться измерять равнодействующую двух сил. Для этого находят равнодействующую двух сил, направленных вертикально вниз, и равнодействующую двух сил, направленных под прямым углом.

Оборудование: металлическое колечко, набор гирь, 3 динамометра, нити.

Ход работы

1. Измерьте с помощью динамометра вес каждого из двух наборов гирь (P_1 и P_2). Учитывая пределы измерения сил школьным лабораторным динамометром, возьмите такие наборы гирь, чтобы сумма P_1 и P_2 не превышала 4 Н.

2. Привяжите к колечку 2 нити. Подвесьте к ним наборы гирь весом P_1 и P_2 .

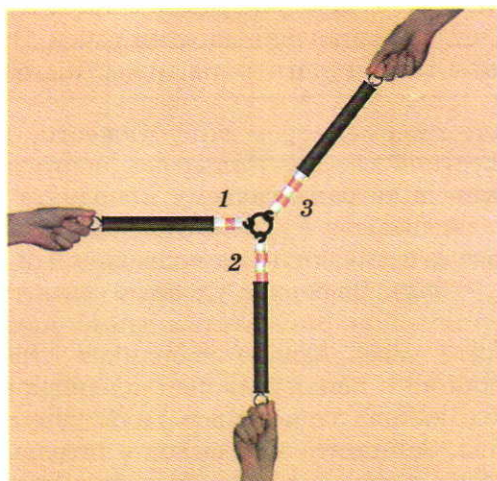
3. Зацепив колечко крючком динамометра, осторожно поднимите колечко и гири. Когда гири покоятся, динамометр показывает модуль равнодействующей сил \vec{P}_1 и \vec{P}_2 , направленных вертикально вниз. Сделайте вывод о том, чему равна равнодействующая сил, направленных в одну сторону, и запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

4. Отвяжите от колечка нити. Положите колечко на стол, зацепите его крючками трех динамометров. Приложите к колечку три горизонтальные силы со стороны динамометров.

Перемещая динамометры, добейтесь, чтобы колечко находилось в равновесии, а силы, приложенные к колечку со стороны динамометров 1 и 2, были взаимно перпендикулярны, как показано на рисунке. В этом случае динамометр 3 показывает модуль равнодействующей двух взаимно перпен-

¹ Эту лабораторную работу удобнее делать вдвоем.

дикулярных сил, приложенных к колечку со стороны динамометров 1 и 2.



Сделайте в тетради чертёж, на котором выполните графическое сложение сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 в этом случае. Проверьте, совпадает ли найденное вами на опыте значение равнодействующей сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 с модулем найденной графически векторной суммы сил. Запишите сделанный вывод в тетрадь.

5. Повторите опыт еще раз, изменив значения сил F_1 и F_2 , и запишите результаты опытов и сделанные выводы в тетрадь.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ УПРУГОСТИ ОТ УДЛИНЕНИЯ ПРУЖИНЫ. ИЗМЕРЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы: исследовать зависимость силы упругости от удлинения пружины, научиться измерять жесткость пружины.

Оборудование: штатив, пружина, линейка, набор гирь массой по 100 г.

Ход работы

1. Подвесьте пружину к штативу. Измерьте линейкой высоту h_0 нижнего края пружины над столом.

2. Подвесьте к пружине гирю массой 100 г. Измерьте высоту h нижнего края пружины над столом. Вычислите удлинение пружины $x = h_0 - h$.

3. Повторите измерения, подвешивая к пружине 2, 3 и 4 гири массой по 100 г.

4. Занесите результаты измерений в таблицу:

№ опыта	m , кг	$F_{\text{упр}}$, Н	h , м	x , м	k , Н/м

5. Начертите в тетради систему координат для построения графика зависимости $F_{\text{упр}}$ от x (поскольку сила упругости уравновешивает действующую на подвешенный груз силу тяжести, то $F_{\text{упр}} = mg$). Выберите удобный масштаб. Поставьте точки, соответствующие результатам ваших измерений.

6. Проведите через начало координат отрезок прямой, близко проходящий к каждой из поставленных вами точек, и сделайте вывод, какова зависимость силы упругости от удлинения пружины. Запишите этот вывод в тетрадь.

7. По данным измерения с наибольшим числом гирь найдите жесткость пружины

$$k = \frac{F_{\text{упр}}}{x} = \frac{mg}{x}.$$

В этом случае точность измерения должна быть наибольшей.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Цель работы: исследовать силу трения скольжения, научиться измерять коэффициент трения скольжения.

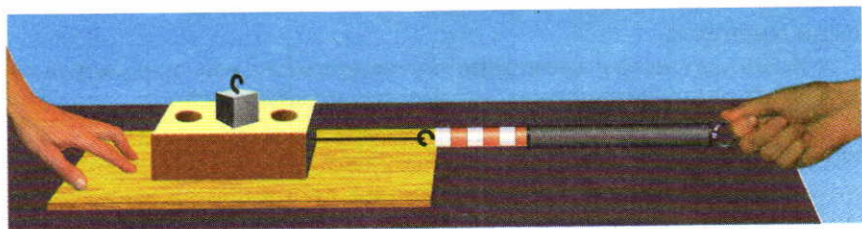
Оборудование: деревянная линейка, брусок, набор гирь массой по 100 г, динамометр.

Ход работы

1. Определите с помощью динамометра вес бруска.

2. Положите брусок на горизонтальную деревянную поверхность так, чтобы самая большая грань бруска соприкасалась с поверхностью. Поставив на брусок одну гирю, **равномерно** тяните брусок по поверхности с помощью динамометра, как показано на рисунке. При равномерном движении пока-

зание динамометра совпадает с модулем силы трения скольжения.



Занесите значения веса P бруска с грузом и соответствующие им показания F динамометра в таблицу:

№ опыта	P , Н	F , Н	$\mu = \frac{F}{P}$

3. Повторите опыт, поставив на брусок 2 и 3 груза. Занесите результаты в таблицу.

4. Вычислите коэффициент трения по формуле

$$\mu = \frac{F}{N},$$

используя результаты опыта с тремя грузами (он обеспечивает наибольшую точность) и запишите его значение.

5. Сделайте вывод: какова зависимость силы трения скольжения от веса тела при движении по горизонтальной поверхности. Запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

6. Повторите измерения, положив брусок на горизонтальную поверхность так, чтобы брусок соприкасался с ней меньшей площадью. Занесите результаты измерений в таблицу. Сделайте вывод: как зависит сила трения скольжения от площади опоры, и запишите его в тетрадь.

7. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЧЕЛОВЕКА¹

Цель работы: научиться измерять собственную мощность (находить мощность, развиваемую при подъеме по лестнице здания).

Оборудование: весы, наручные часы (показывающие секунды), рулетка или сантиметровая лента.

¹ Эту лабораторную работу рекомендуется выполнять как домашнюю.

Ход работы

1. Определите свою массу m с помощью взвешивания (если дома нет подходящих весов, обратитесь в школьный медицинский кабинет).

2. Определите с помощью часов промежуток времени t , за который вы поднимаетесь на несколько этажей.

3. Измерьте на лестничной клетке рулеткой высоту одного этажа (если вам трудно сделать это одному, попросите родителей или приятеля помочь вам) и вычислите высоту h , на которую вы поднялись.

4. Вычислите мощность, развиваемую вами при подъеме:

$$N = \frac{mgh}{t}.$$

Результаты вычислений запишите в тетрадь.

8. ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ НИТЯНОГО МАЯТНИКА И ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы: изучить колебания нитяного маятника, научиться использовать нитяной маятник для измерения ускорения свободного падения, используя формулу для периода колебаний.

Оборудование: штатив, 2 нитяных маятника (металлические шарики разной массы на нитях), часы или секундомер, сантиметровая лента.

Ход работы

1. Подвесьте к штативу нитяной маятник с длиной нити 0,5 м. Отведите шарик от положения равновесия на 2 см и отпустите. Измерьте время 30 полных колебаний, найдите период T колебаний.

2. Повторите опыт, отводя шарик от положения равновесия на 1 см. Сделайте вывод: как зависит период колебаний от их амплитуды, и запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

3. Повторите опыт с другим нитяным маятником такой же длины, но другой массы. Сделайте вывод, как зависит период колебаний от массы шарика, и запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

4. Повторите опыт при двух значениях длины нити: 0,25 и 1 м. Сравните периоды колебаний для этих двух случаев. Сде-

лайте вывод, как зависит период колебаний от длины нити, и запишите сделанный вами вывод в тетрадь.

5. Воспользуйтесь результатами ваших измерений при длине маятника 1 м для вычисления ускорения свободного падения, используя формулу

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Запишите полученный результат в тетрадь.

9. ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Цель работы: изучить колебания пружинного маятника.

Оборудование: штатив, пружина, набор гирь массой по 100 г, часы или секундомер, линейка.

Ход работы

1. Подвесьте пружину к штативу, а к пружине подвесьте одну гирю. Отведите гирю вниз от положения равновесия на 2 см и отпустите. Измерьте промежуток времени t , за который происходят 30 полных колебаний; найдите период T колебаний. Занесите результаты измерений и вычислений в таблицу:

№ опыта	m , кг	t , с	T , с

2. Повторите опыт, отведя гирю от положения равновесия на 4 см. Сделайте вывод, как зависит период колебаний от их амплитуды, и запишите сделанный вывод в тетрадь.

3. Повторите опыт (см. пункт 1), подвешивая к пружине поочередно 2, 3 и 4 гири.

4. Запишите в таблицу периоды колебаний пружинного маятника при различных значениях массы груза (от 0,1 до 0,4 кг).

5. Начертите систему координат для построения графика зависимости квадрата периода колебаний от массы груза. Выберите удобный масштаб. Поставьте точки, соответствующие результатам ваших измерений. Проведите через начало координат отрезок прямой, близко проходящий к каждой из поставленных вами точек.

6. Сделайте вывод о характере зависимости периода колебаний пружинного маятника от его массы. Запишите сделанный вывод в тетрадь.

10. НАБЛЮДЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с линейчатыми спектрами излучения.

Оборудование: источник тока, генератор «Спектр»¹, спектральные трубки с разными атомарными газами, спектроскоп.

Ход работы

1. Наблюдайте с помощью спектроскопа светящийся газ в спектральной трубке.
2. Запишите цвета самых ярких наблюдаемых спектральных линий.
3. Наблюдая с помощью спектроскопа другой светящийся газ, запишите цвета самых ярких наблюдаемых спектральных линий.
4. Сделайте и запишите вывод: какие различия вы заметили в спектрах разных газов?

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

§ 2. 13. 80 км; 120 км; 180 км. 14. 80 км/ч. 15. 75 км/ч; человек ехал на поезде дольше, чем на автомобиле.

§ 3. 9. 2 м/с^2 , еще через 5 с. 12. Прямолинейно и равномерно со скоростью 10 м/с.

§ 4. 9. 1 мин. 10. 6 м/с. 11. 100 м. 13. $8 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$, 2,5 мс.

§ 5. 7. Около 1 км/с. 8. 15 км. 9. 80 м.

§ 7. 18. 12 см; 1 кН/м.

§ 8. 10. 10 Н. 11. 5 кН. 12. При подъеме. 13. В верхней точке траектории. 14. 30 Н или 70 Н. 15. 5 м/с^2 .

§ 10. 10. На поверхности Луны в 6 раз меньше, а на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на поверхности Земли. 11. 1,7 км/с. 13. Второго.

§ 11. 10. 2 м/с. 11. 3,6 Н. 12. 0,3.

§ 12. 12. 3 м/с. 13. 4 м/с. 14. 30 кг. 15. 1 м/с.

§ 13. 13. В 4 раза. 17. 60 Дж. 18. 35 кВт.

§ 14. 13. 20 кН/м. 14. 90 Дж. 16. 36 %. 17. 20 м/с (72 км/ч).

§ 15. 9. Первого; в 1,25 раза. 10. 120 м. 14. 4 см.

§ 16. 8. 1,5 м/с. 9. Второй; в 2 раза.

§ 17. 11. 7,5 км.

¹ Генератор «Спектр» — один (или два) на класс.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Амплитуда волны** 161
— колебаний 150
- Астероиды** 215
- Астрономическая единица** 207
- Атомная бомба** 197
— электростанция 202
- Атомное ядро** 178
- Атомный реактор** 197, 202
- Беккерель А.** 187
- Белые гиганты** 222
- Большой взрыв** 227
- Бор Н.** 183
- Ватт (единица мощности)** 134
- Векторные величины** 13
- Венера** 209
- Вес** 69, 92
- Волны поперечные** 160
— продольные 160
- Второй закон Ньютона** 81
- Высота звука** 168
- Галактика Млечный Путь** 224
- Галактики** 225
- Галилей Г.** 7, 30, 32, 46, 62, 155, 225
- Гамов Дж. (Г. А.)** 227
- Гелиоцентрическая система** 16
- Гельмгольц Г.** 144, 219
- Геоцентрическая система** 16
- Герц (единица частоты)** 151
- Гершель У.** 225
- Голубые гиганты** 222
- Гравитационная постоянная** 100, 103
- Грей (единица поглощенной дозы излучения)** 204
- Громкость** 168
- Гук Р.** 70
- Движение вращательное** 15
— неравномерное 23
— поступательное 9
— равномерное 12
- Дейтерий** 199
- Джоуль (единица работы и энергии)** 130
- Джоуль Дж.** 144
- Динамометр** 72
- Длина волны** 162
- Естественный радиационный фон** 204
- Желтые карлики** 222
- Закон всемирного тяготения** 100
— Гюка 71
— инерции 63
— сохранения импульса 121
— сохранения механической энергии 143
— сохранения энергии 144
— Хаббла 226
- Замкнутая система тел** 120
- Зарядовое число ядра** 186
- Звезды нейтронные** 223
- Звук** 164
- Земля** 210
- Изотопы** 186
- Импульс** 120
- Инертность** 79
- Инерциальные системы отсчета** 64
- Инфразвук** 170
- Кавендиш Г.** 103
- Кирхгоф Г.** 181, 182
- Колебания гармонические** 152
- Кометы** 215
- Коперник Н.** 16
- Королев С. П.** 124
- Коэффициент трения** 109
- Красные гиганты** 223
— карлики 222
- Курчатов И. В.** 201
- Кюри П.** 187
- Луна** 211
- Лучевая болезнь** 203
- Майер Р.** 144
- Марс** 212
- Масса** 79
- Массовое число ядра** 186
- Материальная точка** 8
- Маятник математический** 148
— пружинный 149
- Меркурий** 209
- Механическая работа** 130
- Механические волны** 159
— колебания 148
- Мощность** 133

- Невесомость** 95
- Нейтрон** 185
- Неупругое столкновение (удар)** 119
- Нуклоны** 186
- Ньютон (единица силы)** 69
- Ньютон И.* 16, 32, 61, 63, 64, 81, 88, 100, 102, 220
- Относительность движения** 7
- Первая космическая скорость** 101, 105
- Первый закон Ньютона** 64
- Перемещение** 13
- Период волны** 161
 - колебаний 151, 154, 156
 - обращения 51
 - полураспада 191
- Планетарная модель атома** 178
- Планеты** 207
- Планеты земной группы** 208
- Планеты-гиганты** 213
- Поглощенная доза излучения** 204
- Протон** 185
- Прямолинейное равномерное движение** 19
- Прямолинейное равноускоренное движение** 31
- Путь** 12
- Равнодействующая** 72
- Равномерное движение по окружности** 49
- Радий** 188
- Радиоактивное излучение** 188
- Радиоактивность** 188
- Разбегание галактик** 226
- Реактивное движение** 123
- Реакции деления** 196
 - синтеза 196
 - термоядерные 196
- Резерфорд Э.* 176, 177, 185
- Сатурн** 214
- Сахаров А. Д.* 205
- Световой год** 220
- Свободное падение** 32
- Сила** 67
 - нормальной реакции 70
 - трения покоя 110
 - трения скольжения 68, 107
 - тяги 90
 - тяжести 68
 - упругости 67
- Система отсчета** 10
- Скалярные величины** 13
- Склодовская-Кюри М.* 187
- Скорость волны** 162
 - звука 167
 - мгновенная 24, 26
 - средняя 24
- Сложение сил** 72
- Солнце** 219
- Спектр линейчатый** 180
 - сплошной 180
- Спектральный анализ** 180
- Спектры излучения** 179
- Тамм И. Е.* 205
- Тело отсчета** 10
- Тормозной путь** 42, 112
- Траектория** 10
- Третий закон Ньютона** 88
- Тритий** 199
- Уатт Дж.* 134
- Ультразвук** 169
- Управляемый термоядерный синтез** 204
- Ускорение** 31
 - свободного падения 32
- Ферми Э.* 196
- Фраунгофер Й.* 181
- Фридман А. А.* 227
- Цепная ядерная реакция** 197
- Циолковский К. Э.* 90, 124
- Частота волны** 161
 - колебаний 151
 - обращения 51
- Эйнштейн А.* 198
- Энергия кинетическая** 141
 - механическая 141
 - потенциальная 140
 - связи ядра 198
- Юпитер** 213
- Явление инерции** 63
- Ядерная энергетика** 201
- Ядерные реакции** 194
 - силы 187

СОДЕРЖАНИЕ

К учителю и ученику	3
Глава 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ	
§ 1. Механическое движение. Система отсчета	6
1. Относительность движения	6
2. Материальная точка	7
3. Система отсчета	10
4. Траектория и путь	10
5. Перемещение	12
6. Сложение векторов	13
7. Вращательное движение	15
8. Исторический выбор системы отсчета	16
§ 2. Скорость и путь	19
1. Скорость прямолинейного равномерного движения	19
2. График зависимости пути от времени при прямолинейном равномерном движении	21
3. График зависимости модуля скорости от времени при равномерном движении	22
4. Средняя скорость неравномерного движения	23
5. Мгновенная скорость	24
6. Как определяют мгновенную скорость?	25
7. Путь при неравномерном движении	26
§ 3. Прямолинейное равноускоренное движение	29
1. Прямолинейное равноускоренное движение	29
2. Ускорение	31
3. Когда скорость тела увеличивается, а когда — уменьшается?	32
4. График зависимости модуля скорости от времени	34
§ 4. Путь при прямолинейном равноускоренном движении	39
1. Движение без начальной скорости	39
2. Движение с начальной скоростью	42
3. Вывод формул для пути при прямолинейном равноускоренном движении	43
4. Средняя скорость при прямолинейном равноускоренном движении	44
5. Пути, проходимые за последовательные равные промежутки времени	46
§ 5. Равномерное движение по окружности	49
1. Модуль и направление скорости при равномерном движении по окружности	49

2. Период и частота обращения	51
3. Ускорение при равномерном движении по окружности	52
○ 4. Почему при равномерном движении по окружности ускорение направлено к центру окружности?	53
§ 6. Закон инерции — первый закон Ньютона	59
1. Когда скорость тела изменяется?	59
2. Закон инерции	61
3. Инерциальные системы отсчета и первый закон Ньютона	63
4. Применение явления инерции	64
○ 5. Очевиден ли первый закон Ньютона?	65
§ 7. Взаимодействия и силы	67
1. Силы в механике	67
2. Чем характеризуется каждая сила?	68
3. Примеры действия сил	69
4. Измерение сил	70
5. Сложение сил	72
§ 8. Второй закон Ньютона	76
1. Соотношение между силой и ускорением	76
2. Масса	79
3. Второй закон Ньютона	81
4. Движение тела под действием силы тяжести	82
○ 5. Очевиден ли второй закон Ньютона?	84
§ 9. Третий закон Ньютона	87
1. Третий закон Ньютона	87
2. Свойства сил, с которыми тела взаимодействуют	88
3. Примеры проявления и применения третьего закона Ньютона	89
○ 4. Почему вес покоящегося тела равен силе тяжести?	92
○ 5. Вес тела, движущегося с ускорением	94
○ 6. Невесомость	95
○ 7. Очевиден ли третий закон Ньютона?	96
§ 10. Закон всемирного тяготения	99
1. Закон всемирного тяготения	99
2. Движение искусственных спутников Земли и космических кораблей	100
○ 3. Как был открыт закон всемирного тяготения?	102
○ 4. Как «взвесили» Землю?	103
○ 5. Как найти первую космическую скорость?	105
§ 11. Силы трения	107
1. Сила трения скольжения	107
2. Сила трения покоя	110

○ 3. Сила сопротивления при движении в жидкости или газе	111
○ 4. Тормозной путь автомобиля	112
○ 5. Движение под действием силы тяги и силы сопротивления	113
§ 12. Импульс. Закон сохранения импульса.....	118
1. Импульс.....	118
2. Закон сохранения импульса	120
3. Реактивное движение	123
○ 4. Неупругое столкновение движущихся тел.....	125
§ 13. Механическая работа. Мощность	129
1. Механическая работа.....	129
2. Какую работу надо совершить, чтобы разогнать тело?.....	132
3. Работа различных сил	132
4. Мощность.....	133
○ 5. Когда работа равна нулю?	135
○ 6. Работа нескольких сил	136
§ 14. Энергия.....	139
1. Механическая энергия.....	139
2. Когда механическая энергия сохраняется?.....	142
○ 3. Пример решения более трудной задачи.....	143
○ 4. Закон сохранения энергии	144
§ 15. Механические колебания	148
1. Примеры механических колебаний	148
2. Амплитуда, период и частота колебаний.....	150
3. Гармонические колебания	152
4. Превращения энергии при колебаниях	153
○ 5. Период колебаний нитяного маятника.....	154
○ 6. Период колебаний пружинного маятника	156
§ 16. Механические волны	159
1. Виды механических волн	159
2. Основные характеристики волн	161
§ 17. Звук.....	164
1. Источники звука.....	164
2. Распространение и отражение звука.....	166
3. Громкость, высота и тембр звука	167
○ 4. Неслышимые звуки	169

Глава 2. АТОМЫ И ЗВЕЗДЫ

§ 18. Строение атома. Испускание и поглощение света атомами....	176
1. Опыт Резерфорда.....	176
2. Планетарная модель атома	178

○ 3. Спектры излучения	179
○ 4. Спектры поглощения	181
○ 5. Теория Бора	182
§ 19. Атомное ядро. Радиоактивность	185
1. Протон и нейтрон	185
2. Строение атомного ядра	185
3. Радиоактивность	187
4. Состав радиоактивного излучения	188
5. Как изменяются массовое и зарядовое числа ядра при радиоактивном излучении?	189
○ 6. Период полураспада	191
§ 20. Ядерные реакции	194
1. Ядерные реакции	194
2. Реакции деления и синтеза	196
3. Цепная ядерная реакция	196
○ 4. Энергия связи ядра	198
§ 21. Ядерная энергетика	201
1. Атомная электростанция	201
2. Влияние радиации на живые организмы	203
○ 3. Управляемый термоядерный синтез	204
§ 22. Солнечная система	207
1. Планеты	207
2. Малые тела Солнечной системы	215
○ 3. Происхождение Солнечной системы	216
§ 23. Звезды и галактики	219
1. Источник энергии звезд	219
2. Расстояния до звезд	220
3. Разнообразие звезд	221
4. Судьбы звезд	221
5. Галактики	224
○ 6. Происхождение Вселенной	227
○ 7. От Большого взрыва до человека	227
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ	235
Лабораторные работы	257
Ответы на вопросы и задания	266
Предметно-именной указатель	267