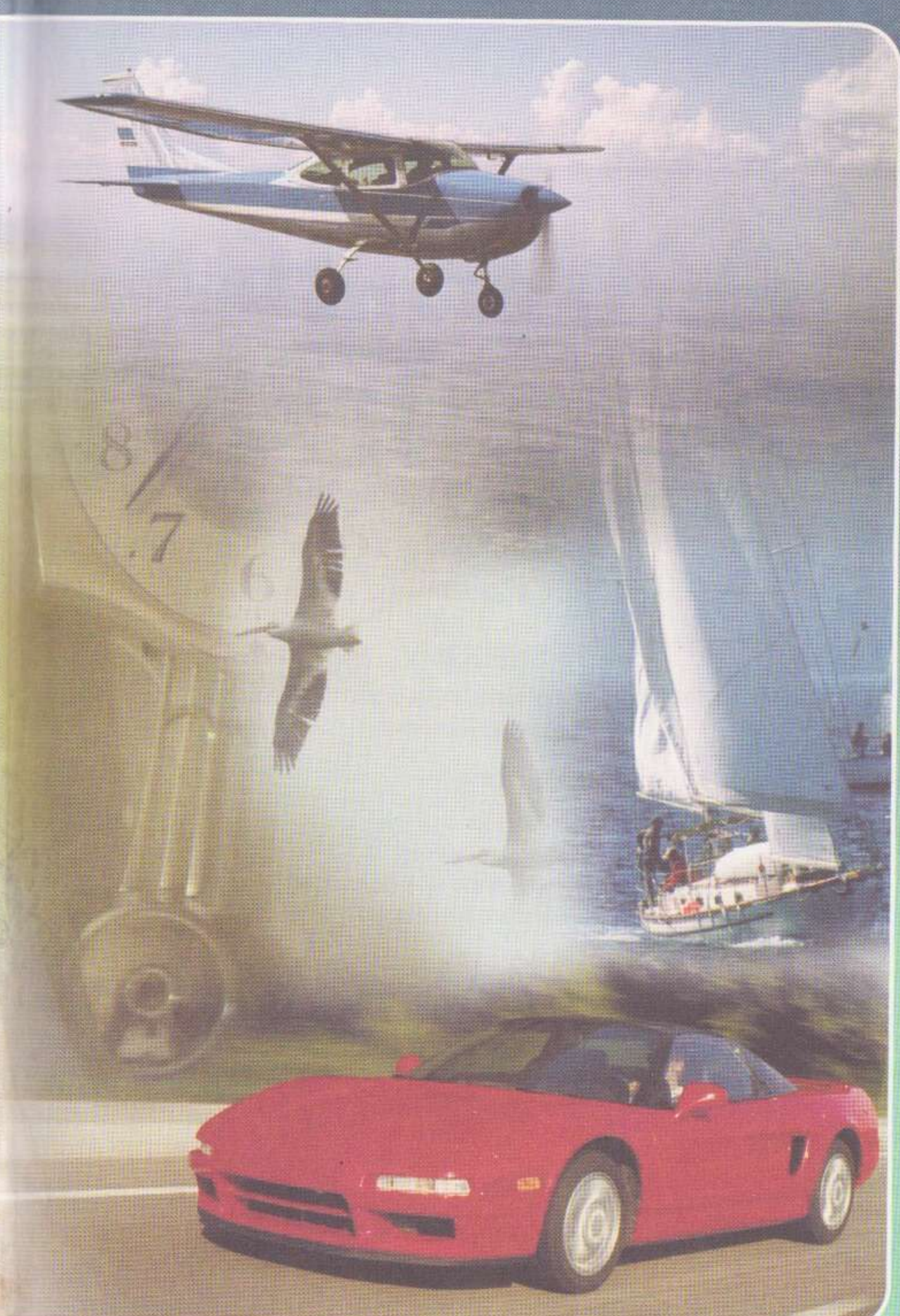
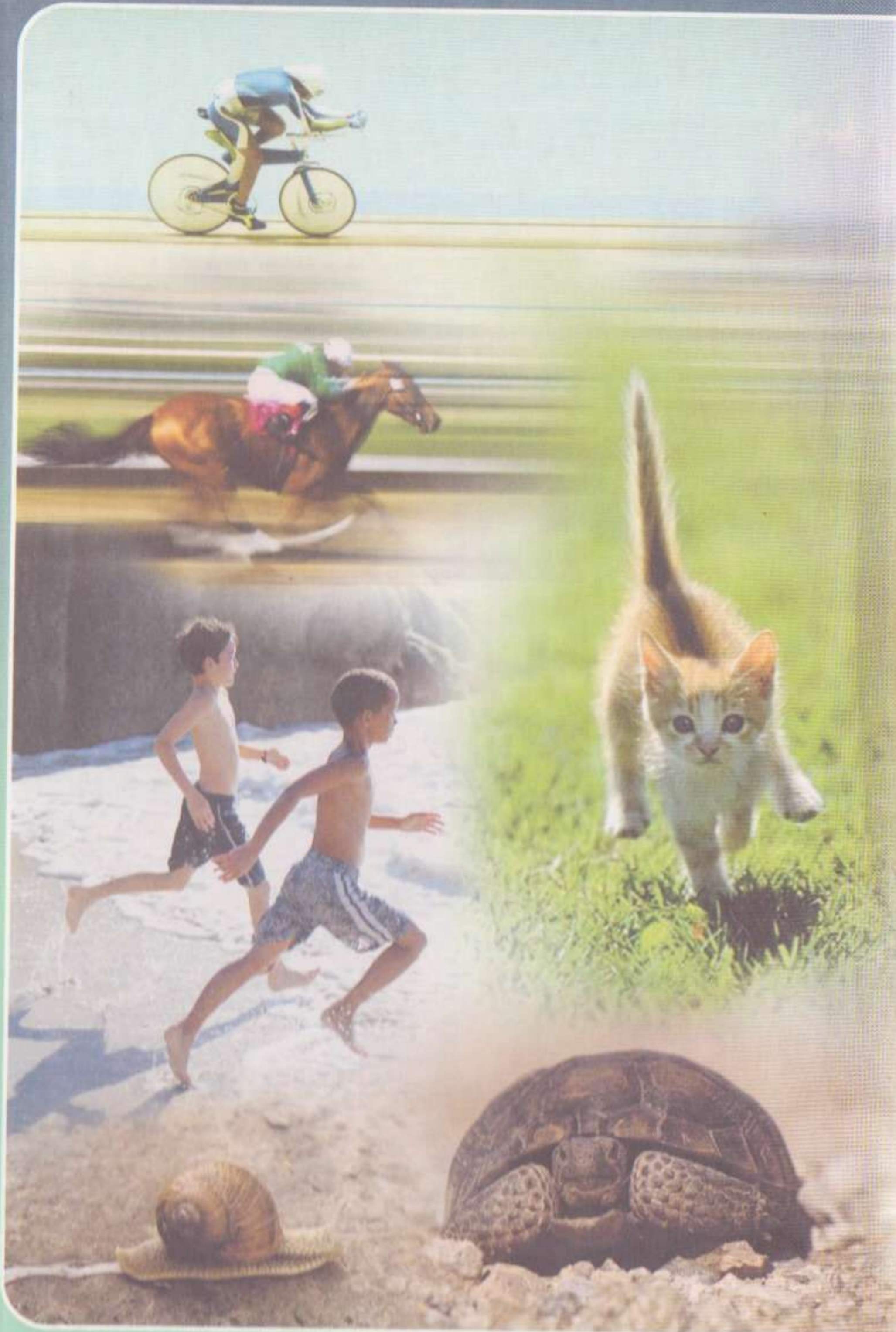


Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик

ФИЗИКА

10 УЧЕБНИК
класс





Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик

ФИЗИКА

10 класс

В двух частях
Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений
(базовый уровень)

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*



Москва 2009

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
Г34

На учебник получены положительные заключения
Российской академии наук (№ 10106–5215/516 от 24.10.2008)
и Российской академии образования (№ 01–5/7д–246 от 06.10.2008)

Генденштейн Л. Э.
Г34 Физика. 10 класс. В 2 ч. Ч. 1. Учебник для общеобразовательных учреждений (базовый уровень) / Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик. — М. : Мнемозина, 2009. — 352 с. : ил.
ISBN 978-5-346-01256-6

В учебнике изложены основы механики, молекулярной физики и электростатики. Четкая структура учебника облегчает понимание учебного материала. Приведено много примеров проявления и применения физических законов в окружающей жизни, сведений из истории физических открытий, дано иллюстрированное описание физических опытов. Приведены примеры решения ключевых задач.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Учебное издание

Генденштейн Лев Элевич, Дик Юрий Иванович

ФИЗИКА 10 класс

В двух частях
Часть 1

УЧЕБНИК

для общеобразовательных учреждений
(базовый уровень)

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.003577.04.09 от 06.04.2009.

Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Школьная».
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,0. Доп. тираж 20 000 экз. Заказ № 7085
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»)
105043, Москва, ул. 6-я Парковая, 29 б.
Тел./факс: 8 (495) 783 8284; тел.: 8 (495) 783 8285.
E-mail: magazin@mnemozina.ru

Торговый дом «Мнемозина» (оптовая продажа книг).
Тел./факс: 8 (495) 665 6031 (многоканальный). E-mail: td@mnemozina.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика в ОАО «ИПК
«Ульяновский Дом печати». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ISBN 978-5-346-01255-9 (общ.)
ISBN 978-5-346-01256-6 (ч. 1)

© «Мнемозина», 2009
© Оформление. «Мнемозина», 2009
Все права защищены

К УЧИТЕЛЮ И УЧЕНИКУ

- Учебник предназначен для изучения физики в 10-м классе на базовом уровне. Исходя из этого материал в учебнике изложен доступно, при необходимости кратко повторяются сведения из курса физики основной школы.
- Авторы стремились представить физику как живую науку, являющуюся частью общей культуры. С этой целью приведено много примеров проявления и применения физических законов в окружающей жизни, сведений из истории физических открытий, дано иллюстрированное описание физических опытов.
- Изложение материала часто ведется в форме диалога: многие подпункты параграфов начинаются с вопроса, ответом на который служит содержание этого фрагмента.
- Вопросы и задания для самопроверки разделены в учебнике на два уровня сложности. Более сложные задания отмечены звездочкой.
- Учебник является ядром учебно-методического комплекта. Второй основной элемент комплекта — задачник, в котором содержатся задачи по всем темам курса, дифференцированные по уровням сложности. Задачник можно использовать для работы в классе и дома.
- В комплект также входят сборник самостоятельных работ, тематические контрольные работы, методические материалы, тетрадь для лабораторных работ и интерактивное приложение на компакт-диске.
- С помощью учебника, задачника и других компонентов комплекта учитель сможет подготовить учащихся к ЕГЭ по физике. Для этого целесообразно дополнительно выделить один час в неделю (за счет школьного компонента).

ФИЗИКА И НАУЧНЫЙ МЕТОД ПОЗНАНИЯ

1. Что и как изучает физика?
2. Научный метод познания
3. Где используются физические знания и методы?

1. ЧТО И КАК ИЗУЧАЕТ ФИЗИКА?

Вы продолжаете изучать одну из главных наук о природе — физику. Физика исследует механические, тепловые, электромагнитные, световые явления, а также строение вещества. Задачей физики, как и других наук, является поиск *законов*, с помощью которых можно объяснять и предсказывать широкий круг явлений.

Физика характеризуется не только кругом явлений, который она изучает, но и методами исследований.

Физика — *опытная (экспериментальная)* наука. При постановке опыта ученый специально создает особые условия протекания интересующего его явления, чтобы уменьшить влияние «помех» и исследовать данное явление в наиболее «чистом» виде.

Важной особенностью физики как науки является широкое использование математики. Благодаря этому предсказания физиков отличаются высокой точностью: в этом отношении другие науки не могут пока соперничать с физикой. Великий итальянский ученый Галилео Галилей писал, что «книгу природы» можно понять, только если знаешь язык, на котором она написана, и язык этот — математика.

О НАУЧНОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

Одна из трудностей при изучении физики связана с тем, что привычные слова, используемые в разговорной речи, приобретают иной смысл, когда они становятся *научными терминами*. Так, в разговорной речи слово «движение» употребляется в различных значениях: можно говорить, например, о «движении души». Такая многозначность слов обогащает речь, даря нам юмор и поэзию.

Ученым же, когда они обсуждают научные вопросы, необходимо точно и однозначно понимать друг друга. Поэтому слова, взятые из разговорного языка для обозначения научных понятий, используются в науке в точно определенном значении. Например, в механике движением называется только изменение

с течением времени положения тела относительно других тел. Мы встретим много других примеров того, как обычные слова становятся научными терминами: тело, скорость, путь, сила, работа, энергия...

Превращая слово в научный термин, ученые вспоминают иногда о юморе и о поэзии. Например, некоторые свойства мельчайших частиц вещества обозначают научными терминами «красота» и «очарование».

2. НАУЧНЫЙ МЕТОД ПОЗНАНИЯ

НАБЛЮДЕНИЕ, НАУЧНАЯ ГИПОТЕЗА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Явления окружающего нас мира чрезвычайно сложны, потому что каждое из них зависит от очень многих причин. Но, внимательно наблюдая то или иное явление, мы замечаем, что какие-то причины более существенны для его протекания, а какие-то — менее.

Из *наблюдений* рождаются предположения, что для целого круга явлений существуют определенные закономерности. Такие предположения называют научными *гипотезами*.

Чтобы проверить гипотезу, ученые ставят *опыты* (эксперименты), создавая *специальные условия* протекания природных явлений. Например, в экспериментах по изучению движения Галилей старался уменьшить роль трения. Так от *наблюдений* ученые переходят к *экспериментам*, то есть начинают задавать вопросы природе.

НАУЧНЫЕ МОДЕЛИ И НАУЧНАЯ ИДЕАЛИЗАЦИЯ

Чтобы сформулировать гипотезу, поставить эксперимент и объяснить его результат, необходимо построить *модель* данного явления или процесса — упрощенное, схематизированное представление, в котором выделены наиболее важные черты. Примерами таких моделей являются *материальная точка* — модель тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, или *идеальный газ* — модель газа, размеры молекул которого пренебрежимо малы, причем взаимодействием между молекулами можно пренебречь.

Полностью устранить в эксперименте помехи, как правило, не удается. Но по результатам эксперимента иногда можно догадаться о том, что должно было бы наблюдаться в идеальной ситуации, то есть в случае, когда все помехи были бы устранены полностью. Эта идеальная ситуация называется *научной идеализацией*. Именно она позволяет увидеть простоту законов, таящихся за внешней сложностью явлений.

С примерами научной идеализации мы будем неоднократно встречаться в нашем курсе.

Мысленный эксперимент

С понятием научной идеализации связано понятие *мысленного эксперимента*, то есть эксперимента, проведенного с помощью воображения. При этом особое значение имеет логическая непротиворечивость результатов мысленного эксперимента.

Пример

Важным примером научной идеализации является так называемое «свободное тело», то есть тело, на которое не действуют другие тела. Совершенно свободных тел, конечно, не существует: даже галактики, находящиеся на огромном расстоянии друг от друга, взаимодействуют между собой. Однако, поставив мысленный эксперимент, то есть мысленно продолжив закономерность, обнаруженную на опытах с реальными телами, можно *представить* тело, которое совершенно не взаимодействует ни с какими другими телами. Размышления о том, как будут двигаться такие тела, привели Галилея к открытию закона инерции.

НАУЧНЫЙ ЗАКОН И НАУЧНАЯ ТЕОРИЯ

Когда гипотеза о протекании физических явлений подтверждается экспериментом, она становится *физическим законом*.

Основное содержание механики составляют законы, сформулированные выдающимся английским ученым Исааком Ньютоном (знаменитые три закона Ньютона), закон всемирного тяготения (открытый тоже Ньютоном), а также закономерности для сил упругости и сил трения. Для газовых процессов открыты законы, описывающие зависимость между давлением, объемом и температурой газа. Взаимодействие покоящихся электрически заряженных частиц подчиняется закону, открытому французским физиком Шарлем Кулоном.

Совокупность законов, которые описывают широкий круг явлений, называется *научной теорией*. Например, законы Ньютона составляют содержание классической теории механики. А законы, сформулированные английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (знаменитые уравнения Максвелла), составляют содержание классической теории электромагнетизма.

Наряду с законами научная теория содержит *определения* физических величин и понятий, с помощью которых формулируются законы этой теории. Очень важно, чтобы все определяемые в физической теории величины могли быть *измерены на опыте*, поскольку справедливость физических законов и теорий может быть подтверждена только опытом.

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ И ТЕОРИЙ

Все физические законы и теории являются *приближением* к действительности, поскольку при построении теорий всегда используется некоторая модель явлений и процессов. Поэтому как законы, так и теории имеют определенные *границы применимости*. Приведем примеры.

1. Классическая механика справедлива только при движении тел со скоростями, намного меньшими скорости света. Если же скорости тел становятся сравнимыми со скоростью света (с такими скоростями движутся, например, наиболее удаленные известные космические объекты и элементарные частицы в ускорителях), предсказания классической механики входят в противоречие с опытами и наблюдениями. Для таких случаев справедлива специальная теория относительности, созданная выдающимся физиком Альбертом Эйнштейном¹ в начале 20-го века.

2. Классическая механика неприменима также для описания явлений, происходящих с частицами очень малой массы — например, электронами. Поэтому в рамках классической механики не могут быть поняты, скажем, особенности строения атома. Для объяснения атомных явлений в начале 20-го века усилиями нескольких ученых разных стран была создана квантовая механика.

3. Знакомая вам из курса физики основной школы геометрическая оптика, основанная на представлении о световых лучах, прекрасно согласуется с опытом, если размеры предметов, с которыми взаимодействует свет, достаточно велики. Но если размеры предметов сравнимы с длиной световой волны или меньше ее, надо использовать волновую теорию света, предложенную в 17-м веке голландским ученым Христианом Гюйгенсом. В основе этой теории лежит представление о световых волнах.

ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ

Появление новой физической теории не отменяет прежнюю теорию, а *уточняет и дополняет* ее. Одним из важнейших требований при создании новых физических теорий является *принцип соответствия*, согласно которому предсказания новой теории должны совпадать с предсказаниями прежней теории в границах ее применимости. Это означает, что новая теория должна включать прежнюю теорию как частный, предельный случай. Принцип соответствия сформулировал в начале 20-го века датский физик Нильс Бор — один из создателей квантовой механики.

¹ Эйнштейн жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

Принципу соответствия удовлетворяют все приведенные выше примеры физических теорий.

Так, предсказания специальной теории относительности совпадают с предсказаниями классической механики, если скорости движения тел намного меньше скорости света. Квантовая механика «превращается» в классическую, если массы тел достаточно велики, а законы волновой оптики — в законы геометрической оптики, если длины световых волн малы по сравнению с размерами препятствий.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Современная физическая картина мира основана на представлении о том, что

вещество состоит из мельчайших частиц, между которыми существует несколько видов фундаментальных взаимодействий.

Это — сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные взаимодействия. Во второй половине 20-го века электромагнитные взаимодействия были объединены со слабыми в «электрослабое» взаимодействие. Сегодня продолжают интенсивные попытки построения «великого объединения» — теории, которая позволила бы объединить все известные виды взаимодействий.

3. ГДЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗНАНИЯ И МЕТОДЫ?

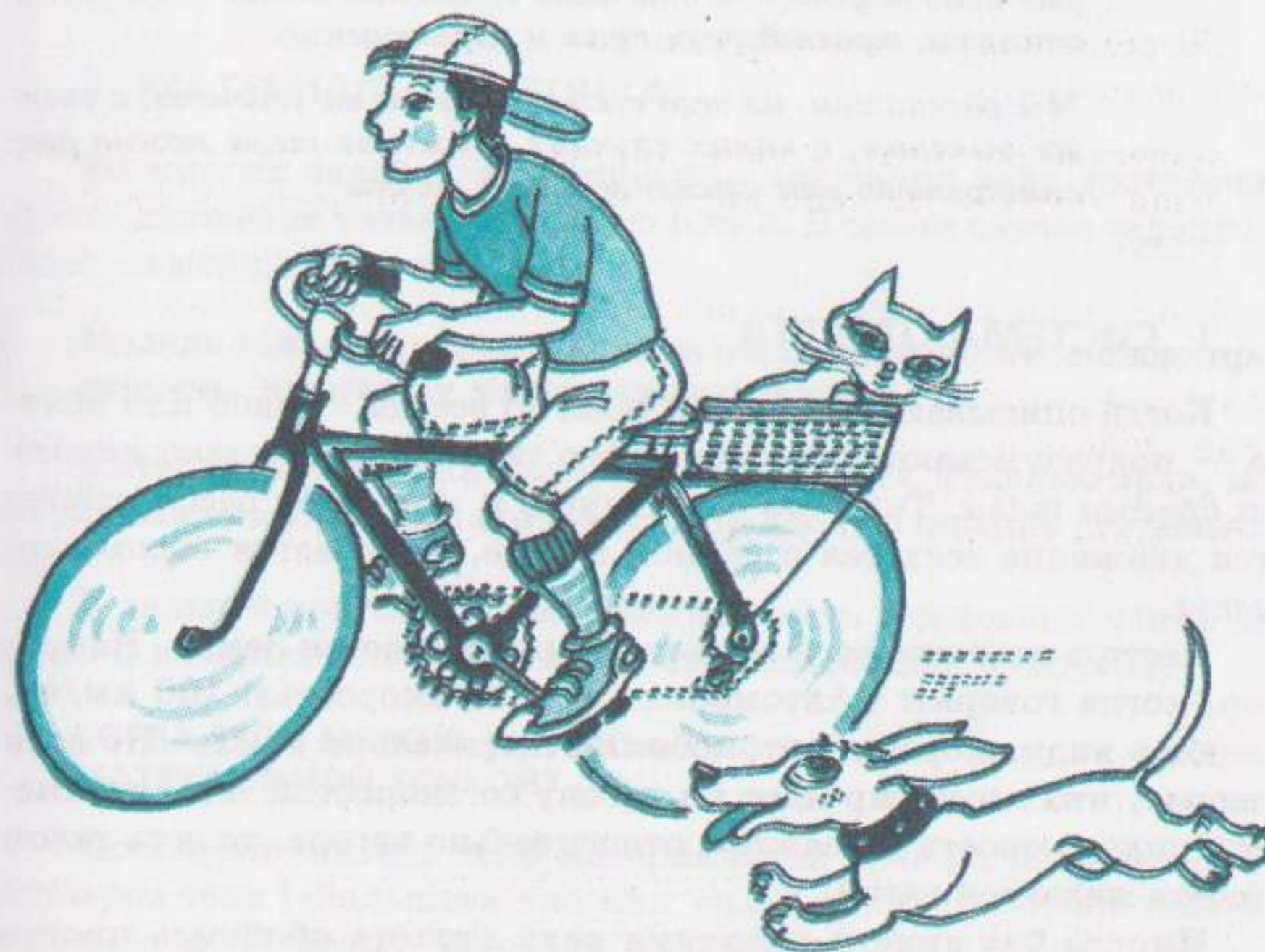
Научившись управлять физическими явлениями, человек стал «великаном»: например, создал двигатели в миллионы раз более мощные, чем человеческие руки, и объединил всех людей Земли надежными системами связи. Чудеса современной техники появились прежде всего благодаря физике: без знания физических законов невозможно проектировать и использовать машины, механизмы, приборы, космические аппараты и т. д.

Однако дело не только в практической ценности физики: знание физики необходимо любому культурному человеку для понимания окружающего мира.

Физические знания и методы рождают новые науки, например биофизику, геофизику, астрофизику.

МЕХАНИКА

Глава 1 КИНЕМАТИКА



Механика изучает механическое движение, то есть изменение с течением времени положения тел друг относительно друга.

Основной задачей механики является определение положения тела в любой момент времени, если известны положение и скорость тела в начальный момент.

В этой главе вводятся основные понятия для описания движения тел. Раздел механики, в котором рассматривается описание движения тел, называют кинематикой.

§ 1. СИСТЕМА ОТСЧЕТА. ТРАЕКТОРИЯ, ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

1. Система отсчета
2. Материальная точка
3. Траектория, путь и перемещение

В этом параграфе мы рассмотрим основные понятия, которые используют для описания движения тела, — систему отсчета, траекторию, путь и перемещение.

Мы расскажем, из чего состоит система отсчета, а также выясним, в каких случаях движение тела можно рассматривать как движение одной точки.

1. СИСТЕМА ОТСЧЕТА

Когда описывают движение тела, то всегда — явно или неявно — подразумевают движение этого тела *относительно какого-то другого тела*. Тело, по отношению к которому рассматривается движение всех тел в данной задаче, называется *телом отсчета*.

Часто в качестве тела отсчета подразумевается Земля. Например, когда говорят: «Автомобиль едет со скоростью 100 км/ч», имеют в виду скорость автомобиля относительно Земли. Но если говорят, что пассажир идет по вагону со скоростью 4 км/ч, имеют в виду скорость пассажира относительно вагона, то есть телом отсчета является вагон.

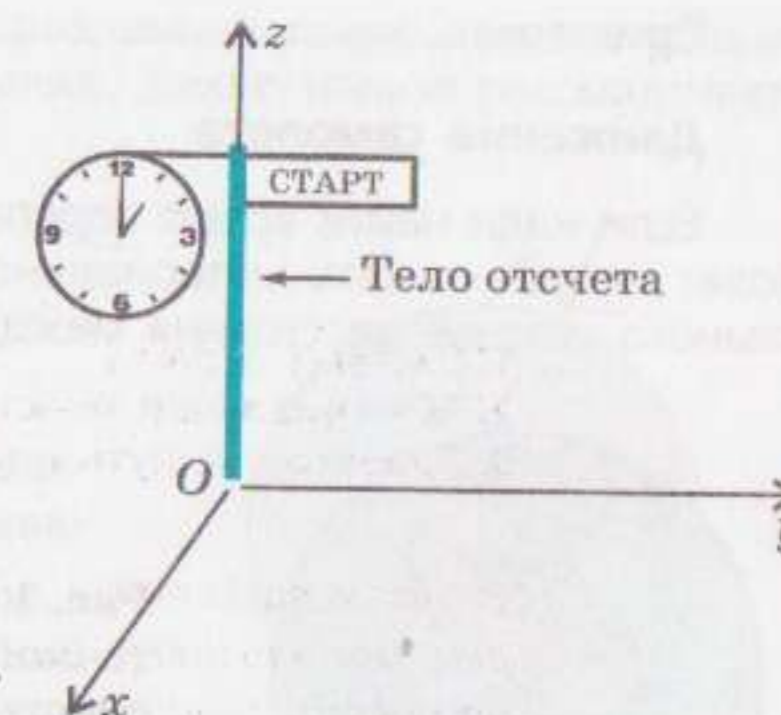
Иногда без явного указания тела отсчета обойтись просто нельзя. Например, фраза: «Ракета летит со скоростью 10 км/с» — будет непонятной, если не указать, относительно какого тела рассматривается движение ракеты — Земли, Солнца или другой ракеты.

Положение тела в данный момент времени задают с помощью *системы координат*, связанной с телом отсчета. А поскольку движение тела характеризуется изменением положения тела с течением *времени*, для описания движения нужны также *часы*.

Тело отсчета и связанные с ним система координат и часы образуют систему отсчета (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Система отсчета

Система отсчета состоит из тела отсчета и связанных с ним системы координат и часов.



2. МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА

Во многих задачах для описания движения тела достаточно задать движение только одной его точки. В таком случае тело мысленно заменяют точкой.

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

Материальная точка является простейшей моделью тела, использование которой значительно упрощает описание его движения.

В дальнейшем мы будем рассматривать в основном такие задачи, в которых тело можно считать материальной точкой.

КОГДА ТЕЛО МОЖНО СЧИТАТЬ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКОЙ?

Можно ли считать тело материальной точкой, зависит не от размеров тела («большое» оно или «маленькое»), а от поставленной задачи. Поэтому одно и то же тело в одних задачах может рассматриваться как материальная точка, а в других — нет.

Так, тело можно считать материальной точкой, если *размеры тела малы по сравнению с расстоянием, пройденным телом*, поскольку в этом случае различие в движении разных точек тела является несущественным.

Тело можно считать материальной точкой также при *поступательном движении* тела, то есть при таком движении, когда все точки тела движутся одинаково (так, что любой отрезок, соединяющий две точки тела, остается параллельным самому себе), поскольку при поступательном движении для описания движения тела достаточно задать движение только одной точки тела.

Примеры

Движение самолета

Если надо найти время перелета самолета между двумя городами, самолет можно считать материальной точкой, потому что размеры самолета намного меньше расстояния между городами (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Самолет можно считать материальной точкой при нахождении времени его полета из одного города в другой

Если нужно описать движение самолета при выполнении фигур высшего пилотажа, то самолет нельзя считать материальной точкой, так как следует учитывать, что при этом различные точки самолета (например, *A*, *B*, *C*) движутся по-разному: самолет может покачивать крыльями, поднимать и опускать нос (рис. 1.3).

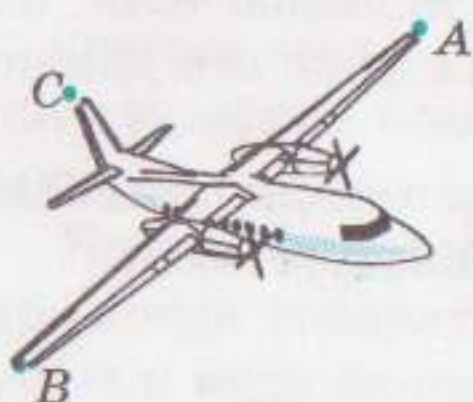


Рис. 1.3. Самолет нельзя считать материальной точкой при описании его движения во время выполнения фигур высшего пилотажа

Движение Земли

При рассмотрении движения Земли вокруг Солнца Землю можно считать материальной точкой, потому что размеры Земли во много раз меньше расстояния от Земли до Солнца (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Землю можно считать материальной точкой при рассмотрении силы, действующей на нее со стороны Солнца.

(Масштаб на рисунке не соблюден.)

Если же нас интересует положение различных точек Земли в разные моменты времени при ее суточном вращении, Землю нельзя рассматривать как материальную точку (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Землю нельзя считать материальной точкой при нахождении скорости движения различных точек ее поверхности

Полет лыжника после прыжка с трамплина

При прыжке с трамплина лыжник в полете движется практически поступательно. Поэтому для описания движения лыжника достаточно задать движение только одной его точки (рис. 1.6). Следовательно, при описании движения лыжника его можно считать материальной точкой.



Рис. 1.6. Поступательное движение лыжника в полете

3. ТРАЕКТОРИЯ, ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

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

Траектория является воображаемой линией, но, если тело оставляет след при движении, эта линия становится видимой. Наглядный пример — след, оставляемый высоко летящим самолетом (рис. 1.7). Этот след показывает траекторию самолета в системе отсчета, связанной с Землей.

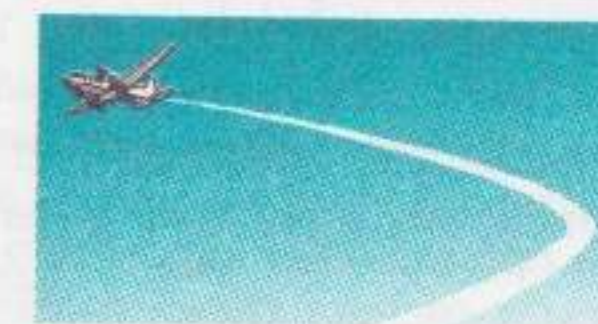


Рис. 1.7. Видимая траектория — след самолета в небе

Если тело вернулось в начальную точку, траектория называется *замкнутой*. Например, если вы утром вышли из дому, а вечером вернулись домой, траектория вашего движения за день является замкнутой.

Длину траектории называют путем, пройденным телом.

Путь является скалярной величиной и обозначается обычно l .

Если некоторые участки траектории накладываются друг на друга (например, при движении по окружности), то путем следует считать сумму длин всех участков траектории. Например, если автомобиль совершил три полных круга по кольцевому шоссе, то пройденный им путь в три раза больше длины окружности.

Чтобы определить точку, в которую переместилось тело в данный момент из начальной точки, задают

перемещение тела — направленный отрезок, проведенный из начального положения тела в его положение в данный момент времени (рис. 1.8).

Перемещение является векторной величиной, его обозначают обычно \vec{s} ; модуль перемещения обозначают s .



Рис. 1.8. Траектория, путь и перемещение

ЗАВИСИТ ЛИ ТРАЕКТОРИЯ ОТ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА?

Да, зависит: например, в одной системе отсчета траектория движения тела может быть прямолинейной, а в другой — криволинейной. Поэтому от выбора системы отсчета зависят и путь, и перемещение тела.

Пример (из книги Галилея)

Пусть с вершины мачты плывущего корабля на его палубу падает ядро. В системе отсчета, связанной с кораблем, траектория движения ядра — прямолинейный отрезок (рис. 1.9, а). С точки же зрения наблюдателя, стоящего на берегу, ядро имело начальную горизонтальную скорость, равную скорости корабля. Поэтому в системе отсчета, связанной с берегом, траектория движения того же самого ядра криволинейная (рис. 1.9, б). Легко видеть, что пройденный ядром путь и перемещение ядра в двух рассмотренных системах отсчета также различны.

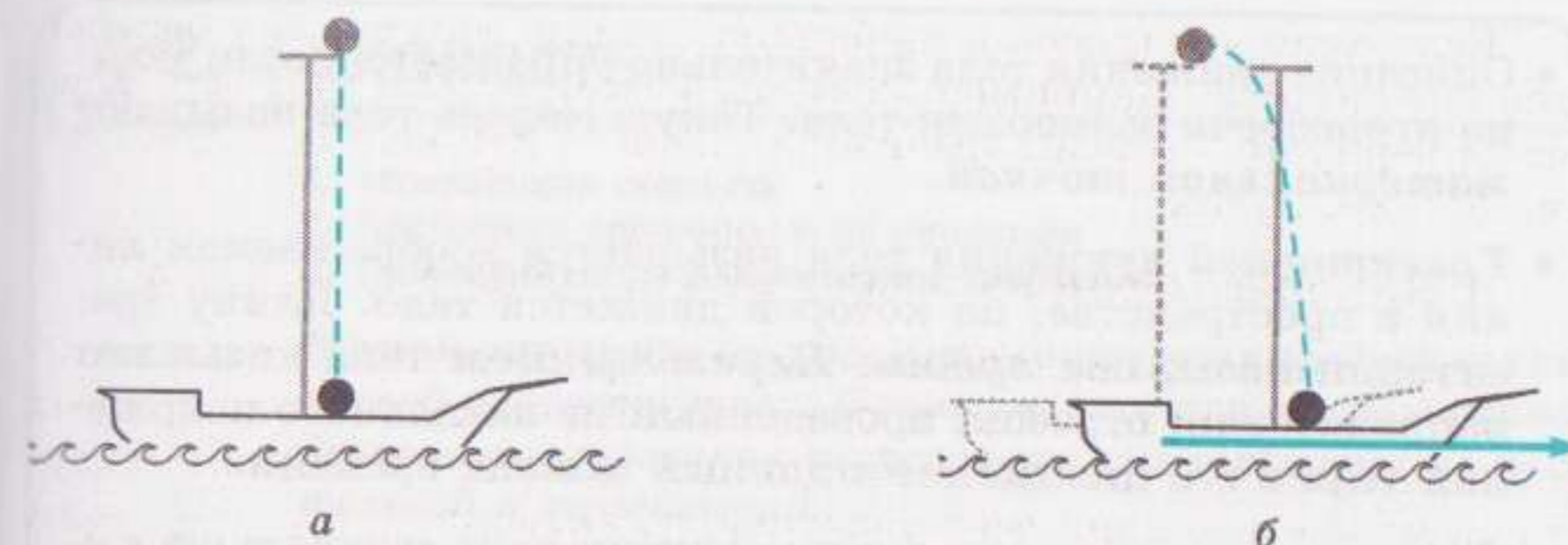


Рис. 1.9. Траектория падающего ядра: а — в системе отсчета «корабль»; б — в системе отсчета «берег»

Изображены два положения корабля и ядра: в начальный и конечный моменты падения.

Поставим опыт

Закрепим картонный или фанерный диск так, чтобы он мог вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 1.10).

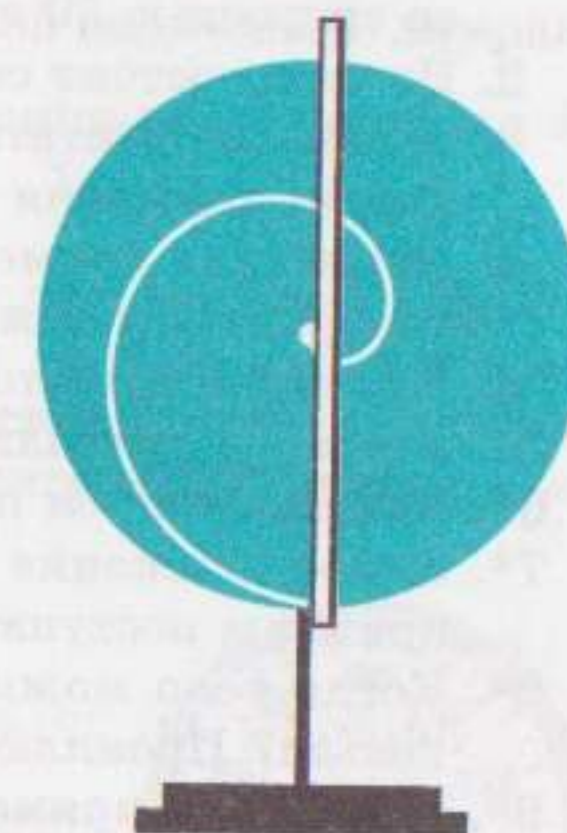


Рис. 1.10. Демонстрация зависимости формы траектории от выбора системы отсчета

Раскрутим диск, поднесем к нему рейку (не касаясь диска) и проведем вдоль рейки куском мела, чтобы мел оставил след на диске. В системе отсчета, связанной с Землей, траектория куска мела прямолинейная — мел движется вдоль рейки. Однако на диске мел вычерчивает спираль, которая показывает траекторию движения того же самого куска мела в системе отсчета, связанной с диском.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Для описания движения тела необходимо выбрать *систему отсчета*, которая состоит из тела отсчета, системы координат, связанной с телом отсчета, и часов.

- Описание движения тела значительно упрощается, если можно пренебречь размерами тела. Такую модель тела называют *материальной точкой*.
- *Траекторией* движения тела называется воображаемая линия в пространстве, по которой движется тело. Длину траектории называют *путем*. *Перемещением* тела называют направленный отрезок, проведенный из начального положения тела в его положение в данный момент времени.
- Форма траектории, путь и перемещение тела *зависят от выбора системы отсчета*.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что принимают за тело отсчета, когда говорят: а) автомобиль едет со скоростью 100 км/ч; б) Земля движется по своей орбите со скоростью 30 км/с?
2. Из чего состоит система отсчета?
3. Можно ли считать Землю материальной точкой при рассмотрении ее движения вокруг Солнца?
4. Приведите примеры задач, в которых спортсмена можно рассматривать как материальную точку.
5. Что такое траектория движения? Приведите примеры прямой и криволинейной траекторий движения.
- 6*. Чем отличается путь от перемещения?
- 7*. Какое движение тела называют поступательным? Приведите примеры поступательного движения.
- 8*. Когда тело можно считать материальной точкой, а когда — нельзя? Проиллюстрируйте свой ответ примерами.
- 9*. Приведите примеры задач, в которых спортсмена нельзя рассматривать как материальную точку.
- 10*. При каком движении путь равен модулю перемещения?
- 11*. Может ли путь при движении тела уменьшаться?

§ 2. СКОРОСТЬ

1. Мгновенная скорость
2. Векторные величины и их проекции
3. Прямолинейное равномерное движение

В этом параграфе мы рассмотрим понятия средней и мгновенной скорости тела. Покажем, что при криволинейном движении мгновенная скорость тела направлена по касательной к траектории.

Мы расскажем о векторных величинах и их проекциях на оси координат, а также о том, как связаны скорости тела в различных системах отсчета.

1. МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ

Из курса физики основной школы вы знаете, что средней скоростью $\vec{v}_{\text{ср}}$ называется отношение перемещения \vec{s} тела к промежутку времени t , в течение которого произошло это перемещение:

$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}$. Средняя скорость является векторной величиной: направление средней скорости совпадает с направлением перемещения \vec{s} , а модуль средней скорости $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$.

Если за равные промежутки времени тело совершает различные перемещения, то говорят, что скорость тела со временем *изменяется*. При этом речь идет о *мгновенной* скорости тела (наглядное представление о мгновенной скорости автомобиля дает показание спидометра, рис. 2.1).



Рис. 2.1. Спидометр

Этот прибор показывает значение модуля мгновенной скорости автомобиля.

Чтобы найти мгновенную скорость тела, рассматривают его среднюю скорость за все меньшие и меньшие промежутки времени: чем меньше промежуток времени, тем ближе средняя скорость за этот промежуток времени к мгновенной скорости.

Мгновенной скоростью тела в данный момент называют отношение перемещения \vec{s} к малому промежутку времени Δt , за который это перемещение произошло: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}$.

В дальнейшем, говоря о скорости тела, мы будем иметь в виду обычно мгновенную скорость.

Пример

В знаменитых «Фейнмановских лекциях по физике» описана такая ситуация (рис. 2.2). Полицейский останавливает машину, и между ним и водителем (женщиной) происходит следующий разговор.

— Мадам, вы нарушили правила дорожного движения: вы ехали со скоростью 90 километров в час.

— Я всего 7 минут назад выехала из дому, как же я могла проехать 90 километров в час?

— Но если бы вы продолжали так ехать, то вы проехали бы за час 90 километров.

— А я и не собиралась так ехать целый час! Я собиралась проехать еще один квартал и остановиться.

Как бы вы на месте полицейского доказали, что правила дорожного движения были все-таки нарушены?



Рис. 2.2. Нарушены ли правила дорожного движения?

КАК НАПРАВЛЕНА МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ?

Чтобы определить, как направлена мгновенная скорость при криволинейном движении, проследим, как изменяется направление средней скорости при неограниченном уменьшении промежутка времени.

На рис. 2.3 изображены перемещения тела $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \vec{s}_4$ за все меньшие и меньшие промежутки времени (в начальный момент тело находилось в точке А).

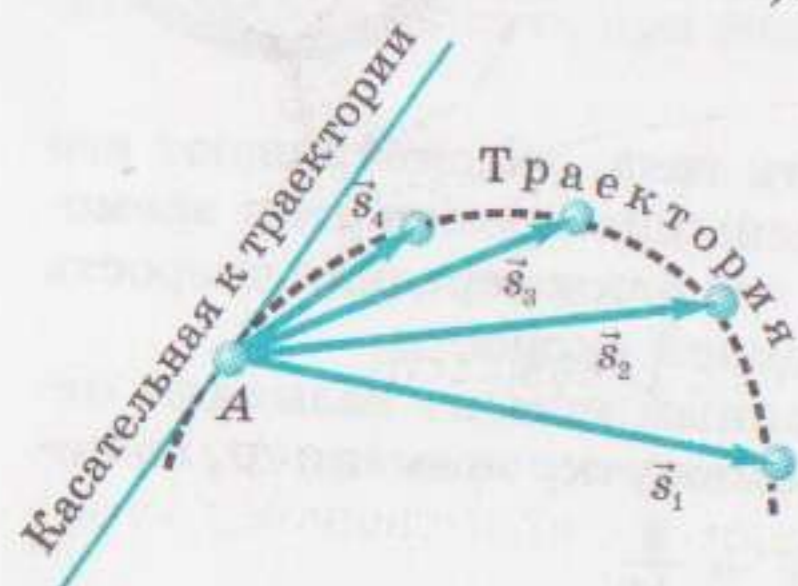


Рис. 2.3. Касательная к траектории и векторы перемещения тела за различные промежутки времени

При уменьшении промежутка времени направление перемещения приближается к направлению касательной.

Мы видим, что чем меньше промежуток времени, тем ближе направление перемещения к направлению касательной к траектории в начальной точке. Так как направление средней скорости $\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{t}$ совпадает с направлением перемещения \vec{s} , то при уменьшении промежутка времени направление средней скорости за этот промежуток приближается к направлению касательной.

А мгновенная скорость — это как раз и есть величина, к которой стремится средняя скорость при неограниченном уменьшении промежутка времени. Следовательно,

при криволинейном движении мгновенная скорость тела в каждой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке (рис. 2.4).

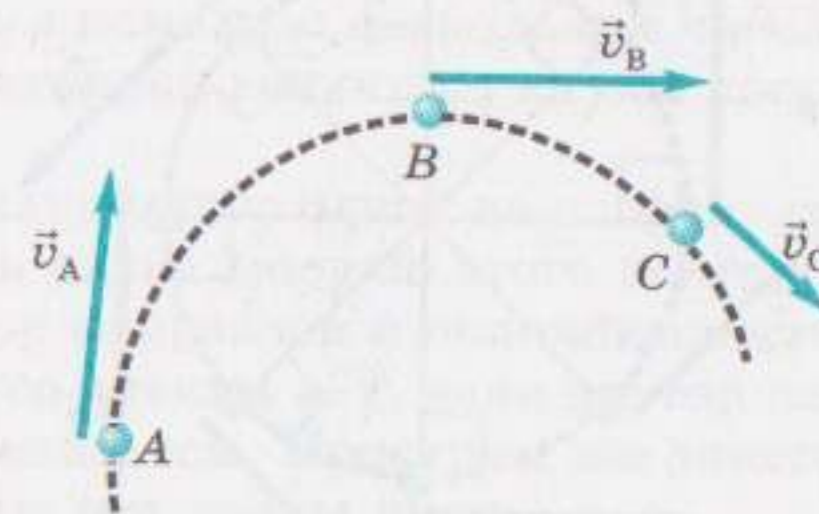


Рис. 2.4. Скорость тела в различных точках траектории при криволинейном движении

Мгновенная скорость в каждой точке направлена по касательной к траектории в этой точке.

Поставим опыт

Чтобы убедиться, что мгновенная скорость при криволинейном движении направлена по касательной к траектории, обратите внимание на искры, летящие при затачивании инструмента на вращающемся точильном камне. Эти искры — оторвавшиеся раскаленные кусочки точильного камня. Их скорость направлена по касательной к окружности и совпадает с мгновенной скоростью точки обода точильного камня в момент касания ее инструмента (рис. 2.5).

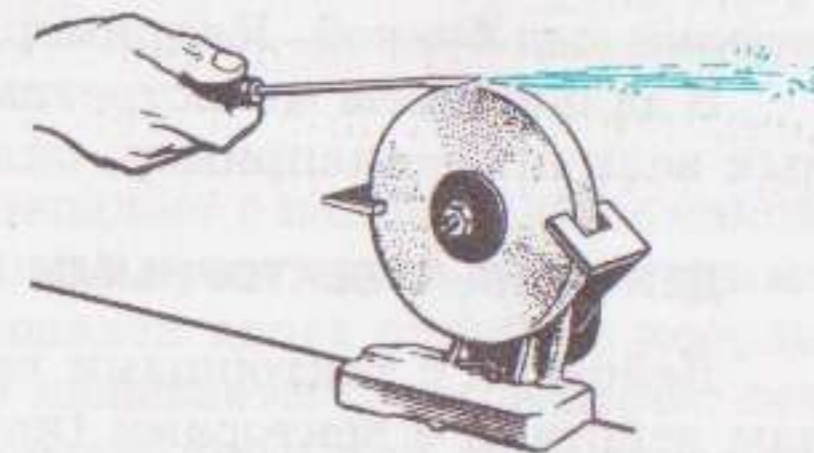


Рис. 2.5. Искры при затачивании инструмента на точильном камне

Направление искр совпадает с направлением мгновенной скорости точки камня, соприкасающейся с инструментом.

Мгновенная скорость при движении по окружности

Как вы знаете из курса геометрии, касательная к окружности в каждой точке перпендикулярна радиусу, проведенному в точку касания.

Следовательно,

при движении по окружности мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена перпендикулярно радиусу окружности, проведенному в эту точку.

На рис. 2.6 изображена мгновенная скорость в различных точках траектории при равномерном движении по окружности (то есть движении с постоянной по модулю скоростью). Мы видим, что хотя модуль скорости тела остается неизменным, скорость как векторная величина *изменяется*, так как изменяется *направление* скорости.

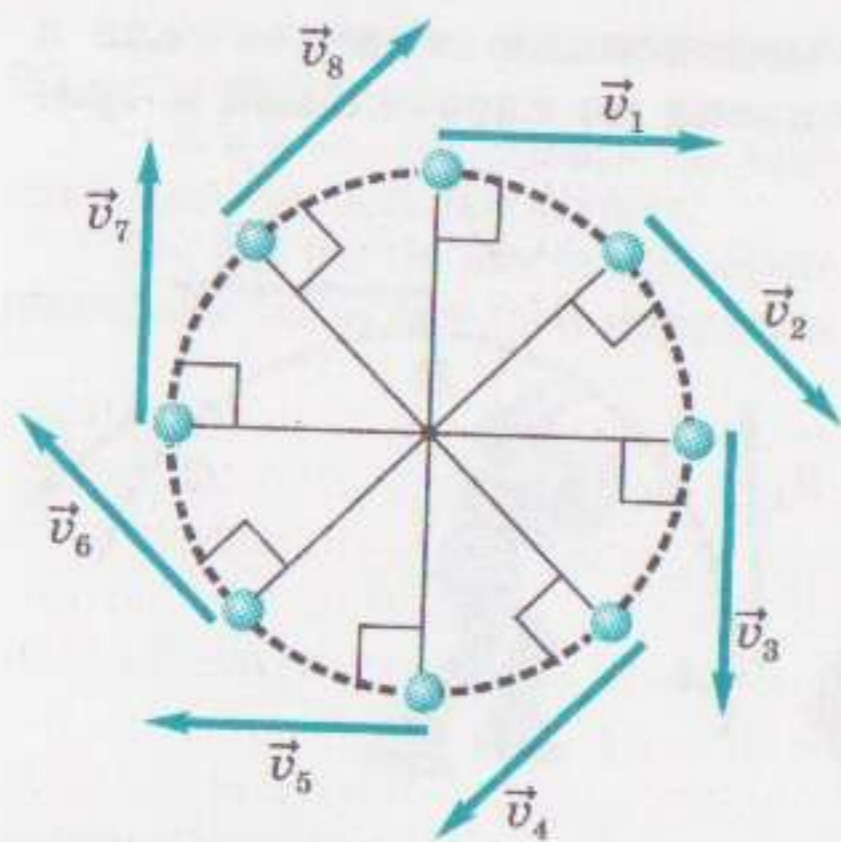


Рис. 2.6. Мгновенная скорость в разных точках траектории при равномерном движении по окружности

Скорость в любой точке траектории направлена по касательной перпендикулярно радиусу, проведенному в точку касания.

2. ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ПРОЕКЦИИ

Мы рассмотрели две физические величины, которые характеризуются *направлением* и *числовым значением (модулем)*: перемещение \vec{s} и скорость \vec{v} . Как вы уже знаете, такие величины называются *векторными величинами*. Модуль векторной величины обозначается такой же буквой, как и сама векторная величина, но без стрелки над буквой. Например, модуль скорости обозначается v .

В дальнейшем мы встретимся и с другими примерами векторных величин — например, силой и ускорением.

ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Действия с векторными величинами производятся по правилам действий с векторами (например, сложение двух векторных величин производится по правилу треугольника или по правилу параллелограмма; рис. 2.7). Часто для краткости векторные величины называют просто векторами. Заметим, однако, что модуль векторной величины (в отличие от модуля вектора) не обязательно измеряется в единицах длины: например, модуль скорости измеряется в метрах в секунду.

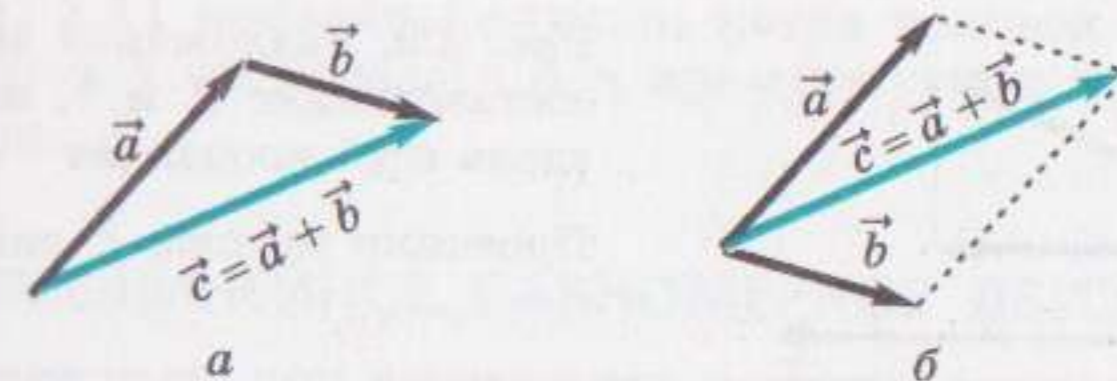


Рис. 2.7. Сложение векторных величин: а — по правилу треугольника; б — по правилу параллелограмма

ПРОЕКЦИИ ВЕКТОРНЫХ ВЕЛИЧИН

Решение многих задач, в которых используются векторные величины, значительно упрощается благодаря тому, что любую векторную величину можно задать с помощью нескольких чисел, называемых *проекциями*¹ этой векторной величины на оси координат.

Если вектор направлен вдоль какой-либо одной из координатных осей, его проекция на эту ось равна модулю этого вектора, вaitому со знаком «+», если вектор направлен в положительном направлении координатной оси, и со знаком «-», если вектор направлен в отрицательном направлении оси. Проекция же такого вектора на остальные координатные оси равны нулю.

На рис. 2.8 в качестве примера изображены векторы \vec{a} и \vec{b} , направленные вдоль оси x . Проекция вектора \vec{a} на ось x положительна, поэтому $a_x = a$, а проекция вектора \vec{b} — отрицательна, поэтому $b_x = -b$.

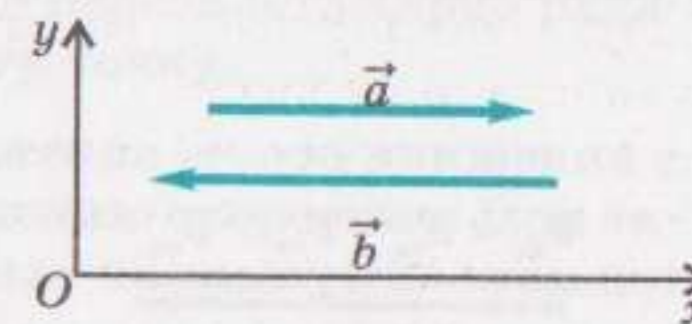


Рис. 2.8. Векторы \vec{a} и \vec{b} , направленные вдоль оси x

Проекция этих векторов на ось x имеют разные знаки.

Если направление вектора не совпадает с направлением какой-либо из координатных осей, его можно представить в виде суммы векторов, каждый из которых направлен вдоль одной из координатных осей. Такое представление называется *разложением вектора на составляющие*. В таком случае проекции вектора — это проекции его составляющих. На рис. 2.9 приведено разложение вектора на составляющие, одна из которых направлена вдоль оси x , а другая — вдоль оси y .

¹ В школьном курсе геометрии проекция вектора называются координатами вектора.

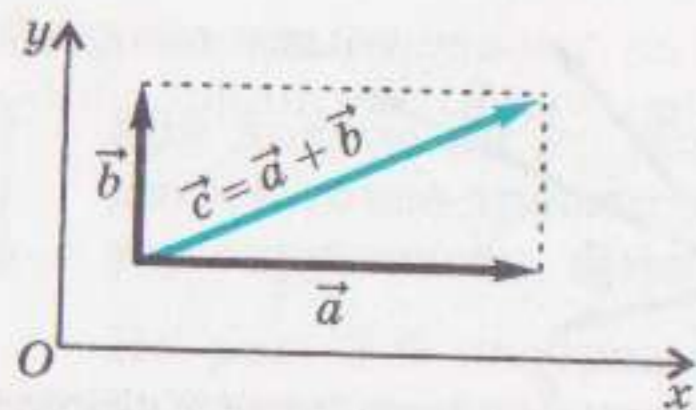


Рис. 2.9. Разложение вектора \vec{c} на составляющие \vec{a} и \vec{b} , направленные вдоль осей координат

Проекции вектора \vec{c} таковы: $c_x = a_x$; $c_y = b_y$.

Если, например, вектор скорости \vec{v} лежит в плоскости xOy , он имеет две проекции: v_x и v_y (рис. 2.10).

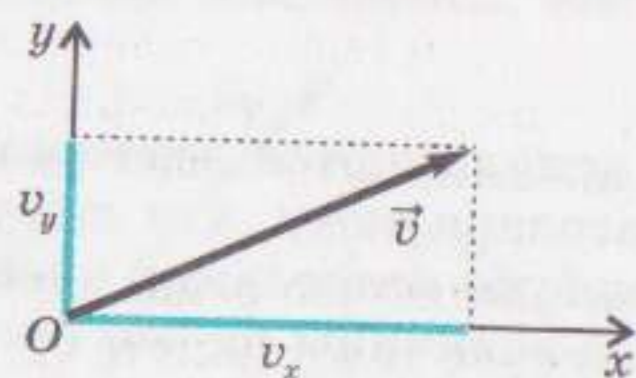
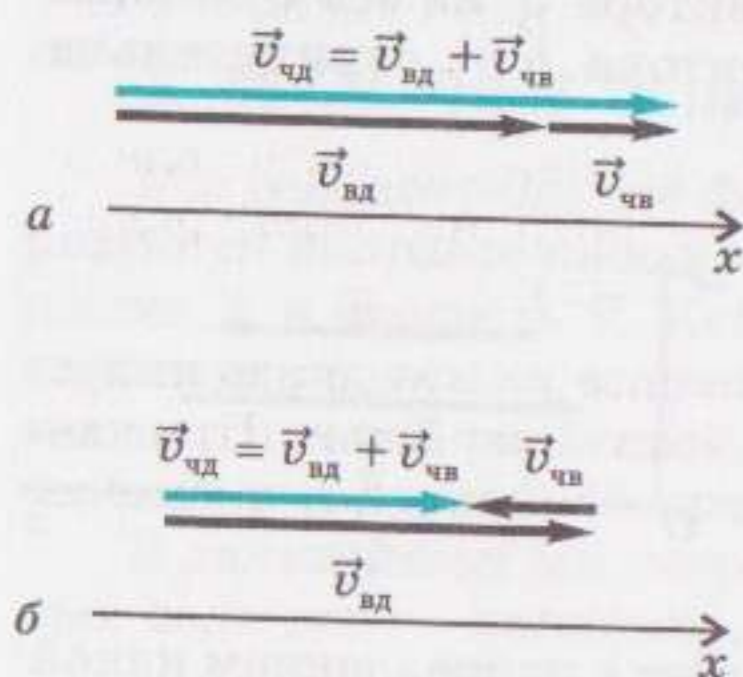


Рис. 2.10. Вектор скорости и его проекции

В данном случае обе проекции вектора положительны.

СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Рассмотрим, как изменяется скорость тела при переходе из одной системы отсчета в другую. Возьмем в качестве примера случай, когда человек идет по вагону едущего поезда. Обозначим скорость человека относительно дороги $\vec{v}_{чд}$, скорость человека относительно вагона $\vec{v}_{чв}$ и скорость вагона относительно дороги $\vec{v}_{вд}$.



По отношению к дороге человек участвует одновременно в двух движениях: он движется относительно вагона и, кроме того, движется вместе с вагоном. Поэтому скорость человека относительно дороги $\vec{v}_{чд} = \vec{v}_{вд} + \vec{v}_{чв}$. Модуль этой скорости зависит от того, как направлена скорость человека относительно вагона.

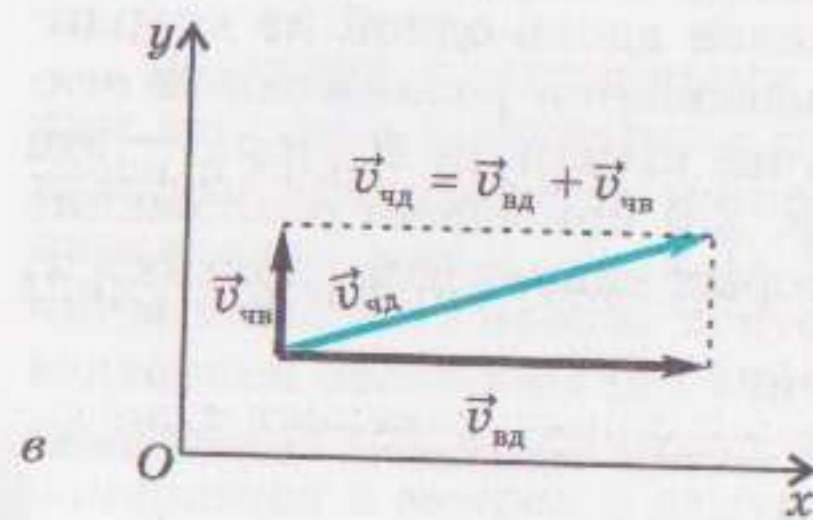


Рис. 2.11. Скорость человека относительно дороги:

a — человек идет по ходу поезда: $v_{чд} = v_{вд} + v_{чв}$;

б — человек идет против хода поезда: $v_{чд} = v_{вд} - v_{чв}$;

в — человек идет под прямым углом к направлению скорости поезда:

$v_{чд} = \sqrt{v_{вд}^2 + v_{чв}^2}$

На рис. 2.11 показаны случаи, когда человек идет по ходу поезда, против хода поезда и под прямым углом к направлению скорости поезда.

3. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Движение тела, при котором его скорость остается постоянной как по модулю, так и по направлению, называют *прямолинейным равномерным движением*. При таком движении перемещение тела $\vec{s} = \vec{v}t$. Отсюда следует, что при прямолинейном равномерном движении тело за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения. Таково, например, движение автомобиля по прямому шоссе, когда стрелка спидометра как бы застывает на одном и том же делении шкалы.

При изучении законов механики прямолинейное равномерное движение представляет особый интерес: именно так движутся друг относительно друга все тела, не подверженные действию других тел (см. § 6. Закон инерции — первый закон Ньютона). Изменение же скорости тела всегда обусловлено действием на это тело других тел (см. § 9. Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона).

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При *криволинейном движении* мгновенная скорость тела в каждой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.
- При *движении по окружности* мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена перпендикулярно радиусу окружности, проведенному в эту точку.
- *Прямолинейное равномерное движение* — это движение с постоянной по модулю и по направлению скоростью. При таком движении тело за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как выражается средняя скорость через перемещение и время движения?
2. Автомобиль за 2 ч проехал 100 км на север. Чему равна средняя скорость автомобиля? Как она направлена?
3. Что такое мгновенная скорость? Какой прибор измеряет мгновенную скорость автомобиля?

4. Может ли мгновенная скорость изменяться только по модулю? Подтвердите свой ответ примером.
5. Как направлена мгновенная скорость при криволинейном движении? Приведите пример опыта, подтверждающего ваш ответ.
6. Тело движется по окружности. Чему равен угол между мгновенной скоростью и радиусом окружности, проведенным в точку, где находится тело в данный момент?
7. Какие величины называют векторными? Приведите примеры векторных величин в физике.
8. Какое движение называют прямолинейным равномерным? Как связаны перемещение и скорость при таком движении?
- 9*. Вернитесь к примеру с полицейским и женщиной-водителем. Как бы вы на месте полицейского доказали, что правила дорожного движения были все-таки нарушены?
- 10*. Может ли мгновенная скорость изменяться только по направлению? Подтвердите свой ответ примером.
- 11*. Может ли мгновенная скорость изменяться одновременно и по модулю и по направлению? Подтвердите свой ответ примером.
- 12*. Автомобиль едет на юго-восток. Каков знак проекций его скорости на координатные оси, если ось x направлена на восток, а ось y — на север?
- 13*. Как изменяется скорость тела при переходе из одной системы отсчета в другую?
- 14*. Приведите примеры сложения скоростей.
- 15*. Заяц делает каждую секунду прыжок на 1 м в одном и том же направлении. Можно ли движение зайца считать прямолинейным равномерным? Обоснуйте свой ответ.

§ 3. УСКОРЕНИЕ. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

1. Ускорение
2. Прямолинейное равноускоренное движение

В этом параграфе мы рассмотрим ускорение — физическую величину, которая характеризует «скорость изменения скорости» тела. Ускорение играет важную роль в механике, потому что именно оно определяется действующими на тело силами.

Мы рассмотрим простейший пример движения с ускорением — прямолинейное равноускоренное движение — и найдем, как изменяются скорость и перемещение тела при таком движении.

1. УСКОРЕНИЕ

Ускорением \vec{a} называется отношение изменения скорости тела к малому промежутку времени, за который это изменение произошло¹: $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$.

Как следует из определения, ускорение — векторная величина. Ускорение может быть направлено под любым углом к скорости.

Примеры

1. Когда автомобиль разгоняется, его ускорение направлено в ту же сторону, что и скорость.
2. Когда автомобиль тормозит, его ускорение направлено противоположно скорости.
3. Когда автомобиль едет по окружности с постоянной по модулю скоростью, его ускорение направлено перпендикулярно скорости (по радиусу к центру окружности — см. следующий параграф).

Чтобы найти, как направлено ускорение, надо уметь находить направление изменения скорости за очень малый промежуток времени. Рассмотрим сначала, как находить изменение скорости за *некоторый* промежуток времени. В дальнейшем, при выводе формулы для ускорения при равномерном движении тела по окружности, мы покажем, как найти изменение скорости за *очень малый* промежуток времени.

Пусть скорость тела в момент времени t_1 была равна \vec{v}_1 , а в момент времени t_2 стала равной \vec{v}_2 (рис. 3.1). Изменение скоро-

¹ Это определение *среднего* ускорения за время Δt . *Мгновенное* ускорение равно среднему ускорению за очень малый промежуток времени.

сти $\Delta \vec{v}$ равно разности скоростей \vec{v}_2 и \vec{v}_1 , то есть $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. На рис. 3.1 показано, как графически находить изменение скорости.

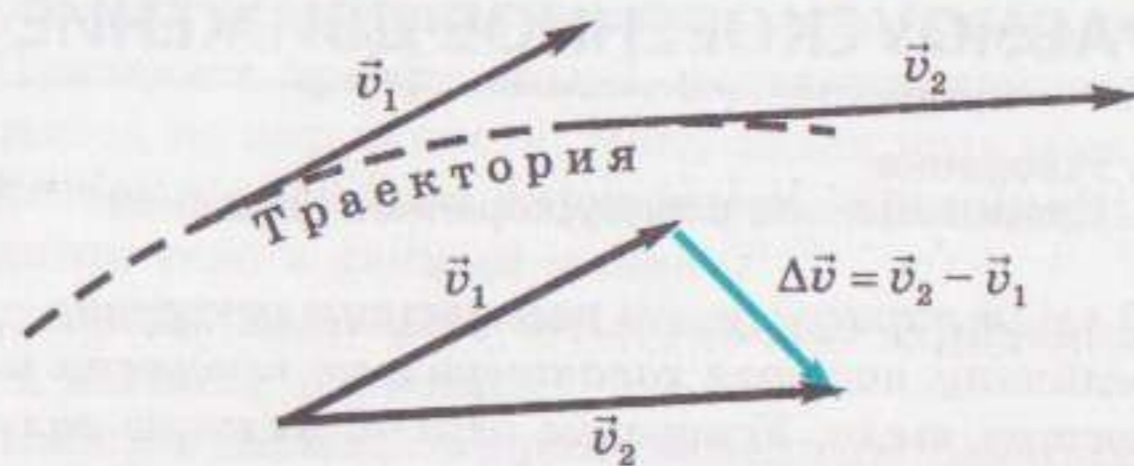


Рис. 3.1. Графическое нахождение изменения скорости
Изменение скорости равно разности конечной и начальной скоростей.

Единица ускорения

В системе СИ единицей ускорения является 1 м/с^2 . Если тело движется в одном направлении с ускорением 1 м/с^2 , то скорость тела каждую секунду изменяется на 1 м/с .

Какова особенность физического термина «ускорение»?

В разговорной речи под словом «ускорение» подразумевают часто увеличение модуля скорости. Например, когда говорят, что автомобиль движется с ускорением, обычно имеют в виду, что его скорость увеличивается. Но вряд ли так скажут о тормозящем автомобиле или о планете, равномерно движущейся по орбите вокруг Солнца.

В физике же термин «ускорение» относится к *любому* изменению скорости, — в том числе и к такому, когда модуль скорости уменьшается или скорость изменяется только по направлению. Поэтому и разгон автомобиля, и его торможение, и равномерное движение планеты вокруг Солнца — это все примеры *движения с ускорением*.

2. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Прямолинейным равноускоренным движением называется движение тела вдоль прямой с постоянным ускорением.

Примером такого движения является свободное падение тел (когда сопротивлением воздуха можно пренебречь).

Из определения ускорения следует, что $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$. Таким образом, при прямолинейном равноускоренном движении скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ

Обозначим \vec{v}_0 скорость тела в начальный момент (при $t = 0$), а \vec{v} — скорость тела в момент времени t . Тогда формула $\Delta \vec{v} = \vec{a} \cdot \Delta t$

примет вид $\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}t$, откуда $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$. Если направить ось x вдоль прямой, по которой движется тело, то для проекции скорости на ось x получим $v_x = v_{0x} + a_x t$, где v_{0x} — проекция начальной скорости, a_x — проекция ускорения. Итак,

при прямолинейном равноускоренном движении проекция скорости $v_x = v_{0x} + a_x t$.

Пример графика зависимости $v_x(t)$ приведен на рис. 3.2.

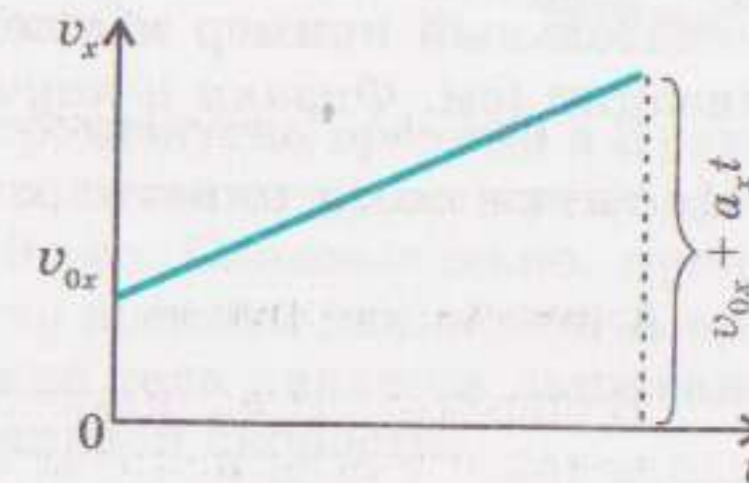


Рис. 3.2. Зависимость проекции скорости от времени при прямолинейном равноускоренном движении

Графиком зависимости $v_x(t)$ является отрезок прямой.

Используя график зависимости $v_x(t)$, можно доказать, что

при прямолинейном равноускоренном движении проекция перемещения $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$.

(Вывод этой формулы приведен в § 5. Примеры решения задач по кинематике.)

При движении без начальной скорости $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$. В этом случае тело движется по прямой в одном направлении, и поэтому пройденный телом путь равен проекции перемещения. Следовательно, в этом случае путь пропорционален *квадрату* времени движения: $l = \frac{at^2}{2}$.

Сейчас мы увидим, как Галилей использовал это соотношение, чтобы доказать, что при свободном падении тела движутся равноускоренно, то есть с постоянным ускорением.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ

Опыты Галилея

Изучая падение тел, Галилей задался целью определить, как изменяется скорость тела при падении? Это было непростой задачей, потому что в распоряжении Галилея были только *водяные часы* (механических часов тогда еще не было).

Галилей догадался, что падение можно существенно «замедлить», скатывая шары по наклонной плоскости.

Проведя измерения, Галилей установил, что путь, пройденный шаром, прямо пропорционален *квадрату* времени движения. А это означало, что шар движется с *постоянным ускорением*. Далее Галилей заметил, что движение остается равноускоренным при *любом* угле наклона плоскости. Отсюда ученый сделал вывод, что и в предельном случае — когда плоскость становится вертикальной и шар уже не скатывается по ней, а просто *падает*, — он тоже движется с постоянным ускорением (рис. 3.3). Это — замечательный пример мысленного эксперимента и научной идеализации (см. *Физика и научный метод познания*).

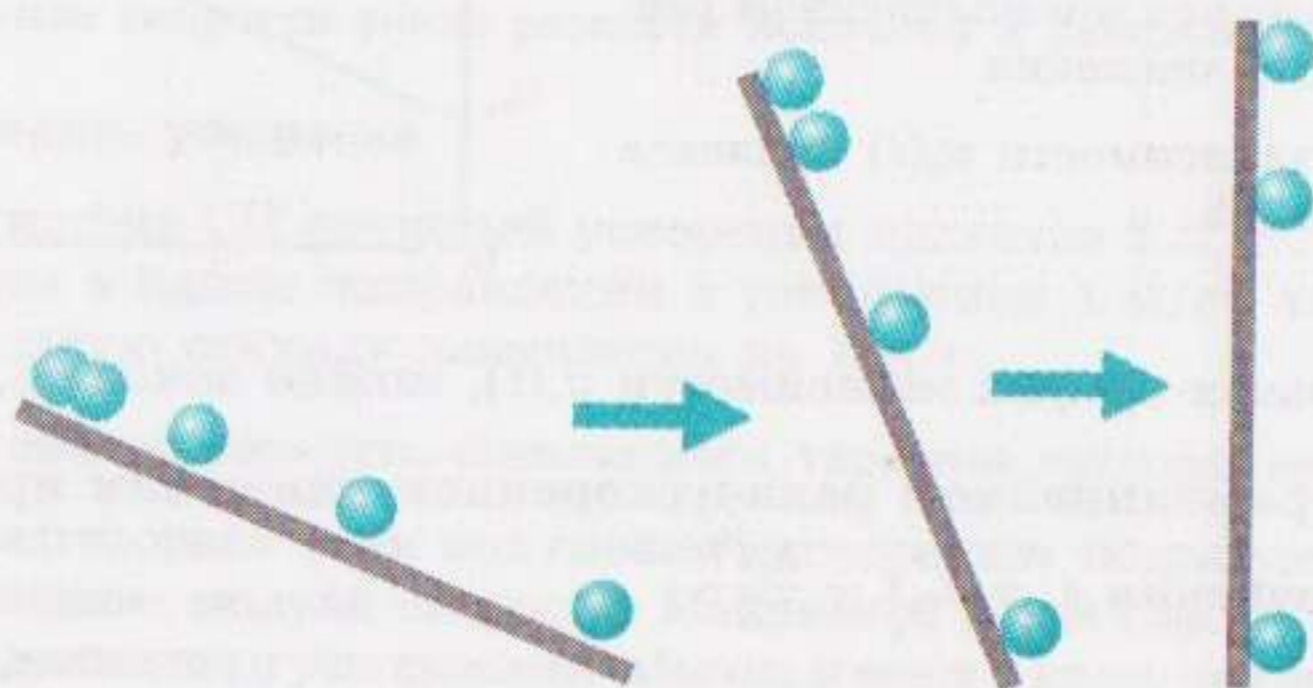


Рис. 3.3. Переход от скатывания по наклонной плоскости к свободному падению

Изображены последовательные положения шара через равные промежутки времени. При любом угле наклона плоскости шар движется с постоянным ускорением.

Поставим опыт

Убедимся и мы на опыте в том, что движение тела по наклонной плоскости является равноускоренным. Для этого опыта можно использовать как скатывание шарика, так и соскальзывание бруска.

Подберем длину и наклон плоскости так, чтобы время движения вдоль всей плоскости было равно 2 с. Отпустим тело без толчка в верхней точке наклонной плоскости и отметим положение тела через 1 с после начала движения. Мы увидим, что за это время, равное *половине* всего времени движения, тело прошло *четверть* всего пути (рис. 3.4).

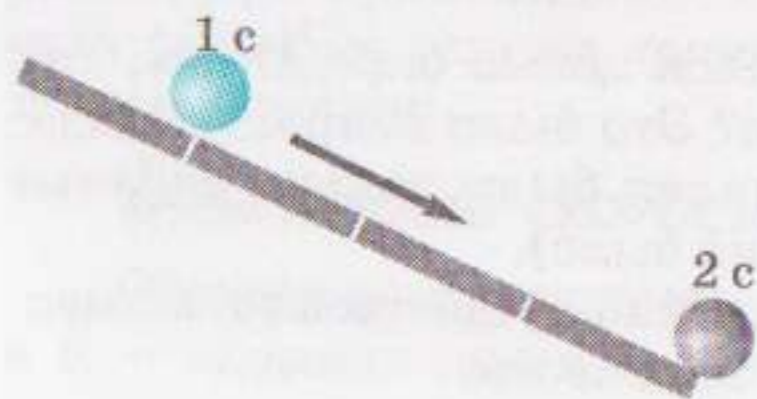


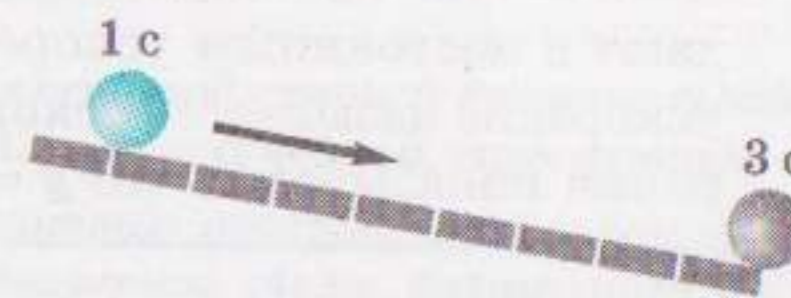
Рис. 3.4. Движение тела по наклонной плоскости

За половину всего времени движения тело проходит четверть всего пути.

Уменьшим теперь наклон плоскости так, чтобы время движения вдоль всей плоскости было равно 3 с. Если мы теперь отметим путь, пройденный телом за 1 с, то есть за *одну треть* всего времени движения, то увидим, что он равен *одной девятой* всего пути (рис. 3.5).

Рис. 3.5. Движение тела по наклонной плоскости

За одну треть всего времени движения тело проходит одну девятую всего пути.



Таким образом, при увеличении промежутка времени в 2 раза путь увеличивается в 4 раза, а при увеличении промежутка времени в 3 раза путь увеличивается в 9 раз. Следовательно, пройденный путь пропорционален *квадрату* времени движения. А это является признаком того, что движение тела является движением с постоянным ускорением без начальной скорости.

Ускорение свободного падения

Многочисленные опыты (первые из которых были поставлены Галилеем) показывают, что если можно пренебречь сопротивлением воздуха, то вблизи поверхности Земли все тела падают с *постоянным и одинаковым* ускорением \vec{g} , направленным вниз.

Это ускорение называют *ускорением свободного падения*. Измерения показывают¹, что вблизи поверхности Земли $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Позже мы выясним, *почему* все тела при свободном падении движутся с постоянным и, более того, *одинаковым* ускорением (см. § 9. Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона; § 11. Всемирное тяготение).

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Ускорением \vec{a} называется отношение изменения скорости тела к малому промежутку времени, за который это изменение произошло: $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Ускорение может быть направлено *под любым углом* к скорости.
- При прямолинейном равноускоренном движении *проекция скорости и проекция перемещения* зависят от времени следующим образом: $v_x = v_{0x} + a_x t$, $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$.

¹ В разных точках земной поверхности значения g немного отличаются (в пределах 0,5%).

- При равноускоренном движении без начальной скорости путь $l = \frac{at^2}{2}$.
- Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, все тела падают с постоянным ускорением \vec{g} , направленным вниз. Это ускорение называется *ускорением свободного падения*. Измерения показывают, что $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называют ускорением?
2. Как изменяется скорость тела, если направление ускорения совпадает с направлением скорости?
3. Как изменяется скорость тела, если направление ускорения противоположно направлению скорости?
4. Какое движение называют прямолинейным равноускоренным?
5. Как зависит проекция скорости от времени при прямолинейном равноускоренном движении?
6. Как зависит проекция перемещения от времени при прямолинейном равноускоренном движении?
7. Как зависит путь от времени при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости?
8. Как движется тело при свободном падении?
9. Чему равно ускорение свободного падения?
- 10*. Тело движется прямолинейно равноускоренно без начальной скорости. Во сколько раз путь, пройденный телом за 5 с, больше пути, пройденного за 1 с?
- 11*. Всегда ли направление ускорения совпадает с направлением скорости? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
- 12*. Может ли скорость тела уменьшаться при прямолинейном равноускоренном движении? Подтвердите свой ответ примером.
- 13*. Приведите пример движения, при котором ускорение направлено перпендикулярно скорости.
- 14*. В начальный момент скорость тела направлена на север и равна 15 м/с, а спустя некоторое время скорость направлена на восток и равна 20 м/с. Найдите графически, чему равно изменение скорости за данный промежуток времени. Как направлено это изменение скорости?

§ 4. КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

1. Движение тела, брошенного под углом к горизонту
2. Равномерное движение по окружности

Если ускорение тела направлено под углом к его начальной скорости, тело движется по криволинейной траектории.

В этом параграфе мы рассмотрим простейшие случаи криволинейного движения — движение тела, брошенного под углом к горизонту, и равномерное движение по окружности.

1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

ЗАВИСИМОСТЬ КООРДИНАТ ТЕЛА ОТ ВРЕМЕНИ

Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, то тело, брошенное с любой начальной скоростью в любом направлении, будет двигаться в полете с постоянным ускорением, равным ускорению свободного падения \vec{g} .

Причина этого будет рассмотрена позже (см. § 12. Движение под действием сил всемирного тяготения), а сейчас мы рассмотрим траекторию движения. Так как тело движется с постоянным ускорением, скорость тела $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$, где \vec{v}_0 — начальная скорость тела, а t — время, прошедшее после броска (см. § 3. Ускорение. Прямолинейное равноускоренное движение). Рассмотрим случай, когда начальная скорость \vec{v}_0 направлена горизонтально.

Совместим начало координат с начальным положением тела и направим ось x горизонтально вдоль \vec{v}_0 , а ось y — вертикально вниз (рис. 4.1). Тогда из формулы $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ получаем для проекций вектора скорости: $v_x = v_0$, $v_y = gt$. Отсюда видно, что брошенное тело как бы участвует одновременно в двух движениях — движется равномерно вдоль оси x со скоростью v_0 и «падает» без начальной скорости вдоль оси y . Поэтому координаты тела в момент времени t можно найти по формулам: $x = v_0t$; $y = \frac{gt^2}{2}$.

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ

В нашем случае траектория тела — это график зависимости $y(x)$. Выразим в формуле $y = \frac{gt^2}{2}$ время t через x , воспользовавшись тем, что $t = \frac{x}{v_0}$. В результате получим $y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$.

Это — уравнение *параболы* с вершиной в начале координат. Следовательно, тело, брошенное горизонтально, будет двигаться по параболе (см. рис. 4.1).

С помощью подобных соображений можно доказать, что это справедливо и в том случае, когда начальная скорость направлена под углом к горизонту. Таким образом,

тело, брошенное горизонтально или под углом к горизонту, движется по параболе.

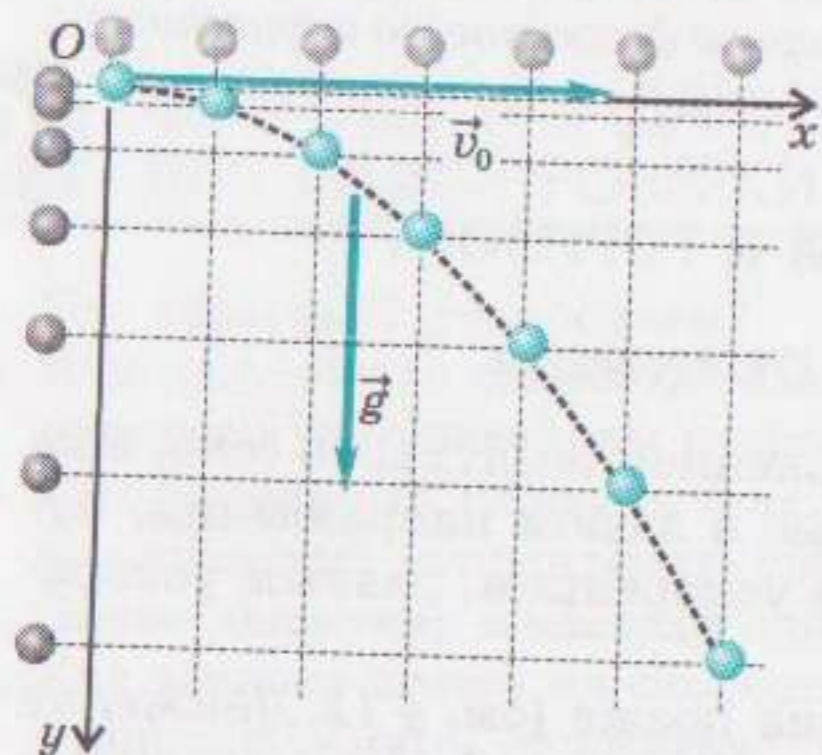


Рис. 4.1. Траектория движения тела, брошенного горизонтально (парабола)

Показаны положения тела через последовательно равные промежутки времени. Для сравнения показаны положения тела, падающего без начальной скорости (темный шарик) и движущегося равномерно по горизонтали со скоростью \vec{v}_0 (светлый шарик).

Поставим опыт

Траекторию движения тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, можно сделать «видимой», если направить под таким углом струю воды (рис. 4.2).

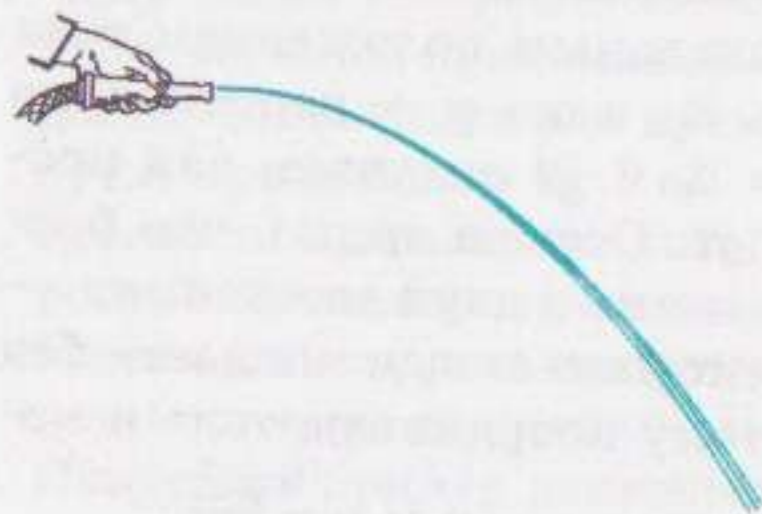
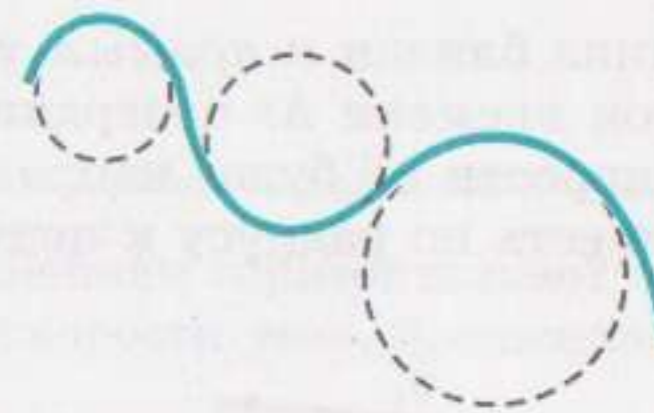


Рис. 4.2. Струя воды показывает траекторию тела, брошенного горизонтально

2. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

По траекториям, близким к окружностям, движутся планеты, Луна, искусственные спутники Земли, точки вращающихся деталей механизмов. Кроме того, любое криволинейное движение можно представить как движение по дугам окружностей с различными радиусами (рис. 4.3).

Рис. 4.3. Криволинейное движение как движение по дугам окружностей с различными радиусами



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПО ОКРУЖНОСТИ

Периодом обращения T называют время одного полного оборота.

Период обращения связан с радиусом окружности r и скоростью движения тела v соотношением $T = \frac{2\pi r}{v}$. Это следует из того, что за время T тело, двигаясь со скоростью v , проходит путь, равный длине окружности $2\pi r$.

Частота обращения ν равна числу полных оборотов за одну секунду.

Докажем, что частота и период связаны соотношением $\nu = \frac{1}{T}$.

Для этого заметим, что согласно определению частоты за время t тело совершает $n = \nu t$ оборотов. Поскольку каждый оборот происходит за время T , то $n = \frac{t}{T}$. Приравнявая правые части этих уравнений, получаем $\nu t = \frac{t}{T}$, откуда $\nu = \frac{1}{T}$.

УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ

При равномерном движении по окружности скорость тела изменяется только *по направлению*. Для нахождения ускорения $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ в данный момент времени надо найти изменение скорости $\Delta \vec{v}$ за *очень малый промежуток времени* Δt (малый по сравнению с периодом обращения T).

Обозначим \vec{v}_1 и \vec{v}_2 скорость тела в моменты времени, разделенные малым промежутком Δt . Изменение скорости $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. При равномерном движении по окружности изменение скорости проявляется только в *повороте* вектора скорости. Следовательно, векторы \vec{v}_1 , \vec{v}_2 и $\Delta \vec{v}$ образуют равнобедренный треугольник (рис. 4.4). Если промежуток времени Δt очень мал, то очень мал и угол при вершине этого треугольника, то есть углы при основании треуголь-

ника близки к *прямым* углам. Это означает, что когда промежуток времени Δt неограниченно уменьшается, вектор изменения скорости $\Delta \vec{v}$ будет направлен *перпендикулярно* вектору скорости, то есть по радиусу к центру окружности.

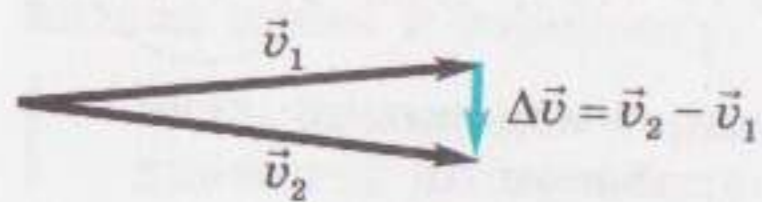
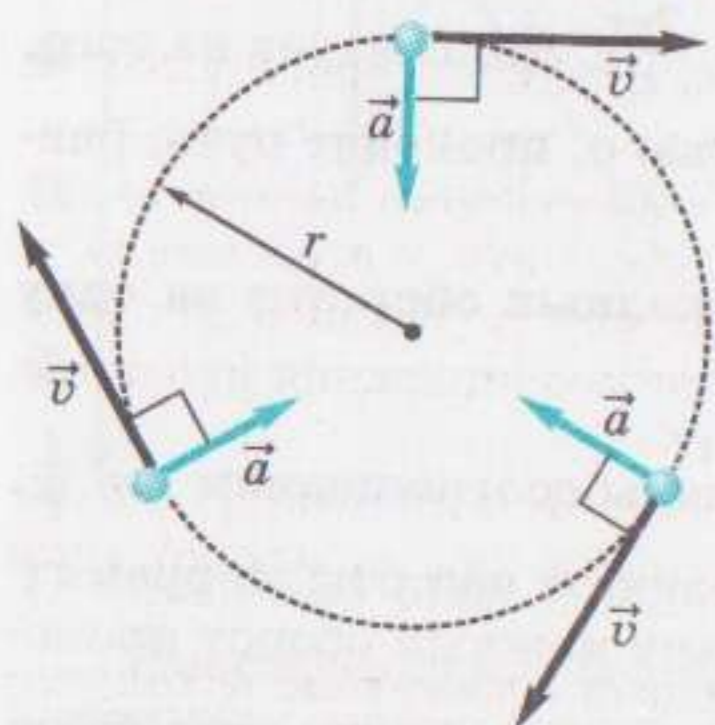


Рис. 4.4. Изменение скорости при равномерном движении по окружности за малый промежуток времени

Следовательно,

при равномерном движении по окружности ускорение тела направлено к центру окружности (рис. 4.5).



По этой причине ускорение тела при движении по окружности называют *центростремительным ускорением*; модуль центростремительного ускорения иногда обозначают $a_{ц}$.

Рис. 4.5. Направление скорости и ускорения тела при равномерном движении по окружности

При равномерном движении по окружности направление ускорения все время изменяется, но модуль ускорения остается постоянным.

Расчет показывает, что

модуль центростремительного ускорения $a_{ц} = \frac{v^2}{r}$.

(Вывод этой формулы приведен в § 5. Примеры решения задач по кинематике.)

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Тело, брошенное горизонтально или под углом к горизонту, движется по *параболе*.
- При *равномерном движении по окружности* ускорение тела направлено к центру окружности. Это ускорение называют *центростремительным ускорением*. Модуль центростремительного ускорения $a_{ц} = \frac{v^2}{r}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какова форма траектории тела, брошенного горизонтально?
2. Изменяется ли со временем модуль скорости тела, брошенного под углом к горизонту?
3. Каковы основные характеристики равномерного движения по окружности? Как они связаны друг с другом?
4. Как направлено ускорение при равномерном движении по окружности?
5. Чему равен модуль ускорения при равномерном движении по окружности?
- 6*. Какова форма траектории тела, брошенного под углом к горизонту?
- 7*. Два тела одновременно брошены горизонтально с одной высоты. Скорость первого тела в 2 раза больше, чем скорость второго тела. Сравните времена движения тел до падения на землю.
- 8*. Первое тело бросили под углом 30° к горизонту, а второе тело — под углом 45° к горизонту, причем оба тела поднялись до одной и той же высоты. У какого тела больше вертикальная проекция начальной скорости? горизонтальная?
- 9*. Мяч ударили ногой, и он полетел под углом к горизонту. Сколько времени мяч находился в полете (до падения на землю), если он поднялся до высоты 5 м?
- 10*. Как связаны периоды обращений часовой, минутной и секундной стрелок часов? Для какой из стрелок частота обращения наибольшая? Чему она равна?
- 11*. Приблизительно можно считать, что планеты движутся по круговым орбитам, в общем центре которых находится Солнце. Что общего у ускорений всех планет?

¹ При выполнении заданий этого и следующих параграфов сопротивление воздуха не учитывайте и примите $g = 10 \text{ м/с}^2$.

§ 5. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО КИНЕМАТИКЕ

1. Переход в другую систему отсчета
2. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении
3. Движение по окружности

1. ПЕРЕХОД В ДРУГУЮ СИСТЕМУ ОТСЧЕТА

Решение задач о движении двух тел часто значительно упрощается, если перейти в систему отсчета, связанную с одним из этих тел (то есть в систему отсчета, в которой это тело покоится).

Задача 1. ДВИЖЕНИЕ ПО РЕКЕ

Проплывая на моторной лодке под мостом, рыбак уронил в реку соломенную шляпу. Через час он заметил пропажу, повернул обратно и нашел плывущую шляпу на 4 км ниже моста по течению. Чему равна скорость течения реки, если вначале лодка двигалась против течения реки, причем скорость лодки относительно воды была все время постоянна и равна 10 км/ч? Есть ли в условии задачи лишние данные? Задачу можно решить устно.

Решение

Чтобы узнать скорость течения реки, достаточно найти, сколько времени плыла шляпа по течению: зная пройденный шляпой путь и время ее движения, мы определим скорость течения. До разворота лодки шляпа плыла один час; следовательно, остается узнать, сколько времени после разворота лодка двигалась к плывущей шляпе.

Если бы все происходило в *стоячей* воде, ответ был бы очевиден: «от шляпы» и «к шляпе» лодка плыла бы *одинаковое* время, потому что двигалась бы с одной и той же по модулю скоростью. Но наличие течения не изменяет этот вывод! Чтобы убедиться в этом, перейдем в систему отсчета, связанную с плывущей шляпой. Так как шляпа плывет по течению, *в этой системе отсчета вода неподвижна* и, следовательно, относительно шляпы лодка движется как бы в *стоячей* воде, то есть с одинаковой по модулю скоростью — как до разворота, так и после него. Значит, от момента разворота до «поймки» шляпы прошел тоже один час. Таким образом, шляпа плыла по течению два часа. По условию, за это время она проплыла 4 км; следовательно, скорость течения реки 2 км/ч.

Для нахождения ответа нам не понадобилось ни значение скорости лодки относительно воды, ни начальное направление движения лодки. Следовательно, эти данные являются лишними.

Задача 2. ВСТРЕЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Пассажир поезда заметил, что две встречные электрички промчались мимо него с интервалом $t_1 = 6$ мин. С каким интервалом времени t_2 проехали эти электрички мимо станции, если поезд, в котором находится пассажир, движется со скоростью $v_1 = 100$ км/ч, а скорость каждой из электричек $v_2 = 60$ км/ч?

Решение

Электрички проедут мимо станции с интервалом времени $t_2 = \frac{s}{v_2}$, где s — расстояние между электричками. Это расстояние легко найти в системе отсчета, связанной с поездом. Поскольку поезд и электрички едут навстречу, в системе отсчета, связанной с поездом, электрички движутся со скоростью $v_{отн} = v_1 + v_2$. Так как они проходят мимо поезда с интервалом времени t_1 , то $s = v_{отн}t_1 = (v_1 + v_2)t_1$. Следовательно, $t_2 = \frac{(v_1 + v_2)t_1}{v_2} = 16$ мин.

Задача 3. ДВИЖЕНИЕ БРОШЕННЫХ ТЕЛ

Из одной точки одновременно бросили два тела: одно вертикально вверх с начальной скоростью 3 м/с, а другое — вертикально вниз с начальной скоростью 1 м/с. Чему будет равно расстояние между телами через 2 с после броска, если в это время тела еще находились в полете? Считайте, что сопротивлением воздуха можно пренебречь. Задачу можно решить практически без вычислений.

Изменился бы ответ, если бы опыт проводился на Луне?

Решение

Чтобы найти расстояние между телами, выясним, как они движутся *друг относительно друга* (или, что то же самое, перейдем в систему отсчета, связанную с одним из этих тел). Обозначим \vec{v}_1 и \vec{v}_2 скорости тел в момент времени t . Поскольку оба тела движутся с ускорением свободного падения \vec{g} , то $\vec{v}_1 = \vec{v}_{10} + \vec{g}t$, $\vec{v}_2 = \vec{v}_{20} + \vec{g}t$, где \vec{v}_{10} и \vec{v}_{20} — начальные скорости тел.

Второе тело движется относительно первого со скоростью $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{v}_{20} + \vec{g}t - (\vec{v}_{10} + \vec{g}t) = \vec{v}_{20} - \vec{v}_{10}$.

Мы видим, что *относительная* скорость брошенных тел не зависит от времени, то есть друг относительно друга тела движутся

прямолинейно и равномерно! Причем из вывода следует, что это остается в силе и в том случае, когда одно тело или оба брошены под любым углом к горизонту.

Так как тела движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, расстояние между ними можно найти по формуле $s = v_{\text{отн}}t$. В начальный момент движения тела движутся в противоположных направлениях, поэтому $v_{\text{отн}} = v_1 + v_2$. Следовательно, $s = (v_1 + v_2)t = 8$ м.

Если бы опыт проводился на Луне, ответ не изменился бы, так как в него не входит ускорение свободного падения.

2. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Задача 4. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

Докажите, что при прямолинейном движении площадь фигуры, ограниченной графиком проекции скорости, численно равна модулю проекции перемещения.

Решение

Рассмотрим сначала *равномерное* движение. Направим ось x вдоль прямой, по которой движется тело. Тогда в проекциях на ось x получим: $v_x = \text{const}$; $s_x = v_x t$. Если изобразить график $v_x(t)$, то фигура, ограниченная этим графиком и осью t , будет прямоугольником, площадь которого численно равна $s_x = v_x t$, то есть модулю проекции перемещения (рис. 5.1). Таким образом, для равномерного движения утверждение доказано.

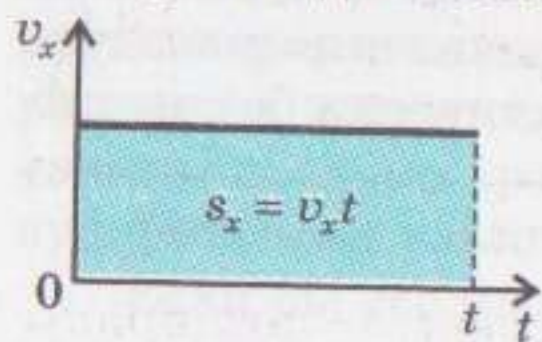


Рис. 5.1. График зависимости проекции скорости от времени при равномерном движении

В случае *неравномерного* движения все время движения можно мысленно разбить на такие малые промежутки времени, в течение каждого из которых движение тела можно считать практически равномерным (рис. 5.2).

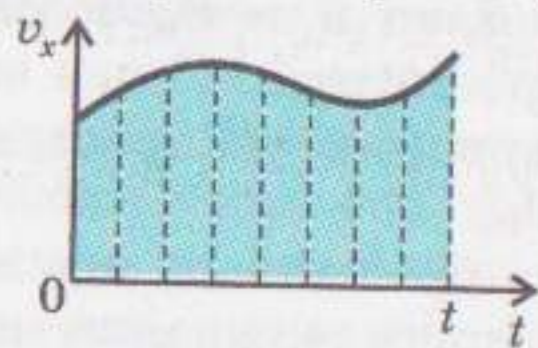


Рис. 5.2. График зависимости $v_x(t)$ при неравномерном движении

Согласно уже доказанному для каждого такого промежутка времени проекция перемещения численно равна площади под соответствующим участком графика. Отсюда следует, что и за все время движения перемещение численно равно площади фигуры, ограниченной графиком проекции скорости.

Доказательство завершено.

Задача 5. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

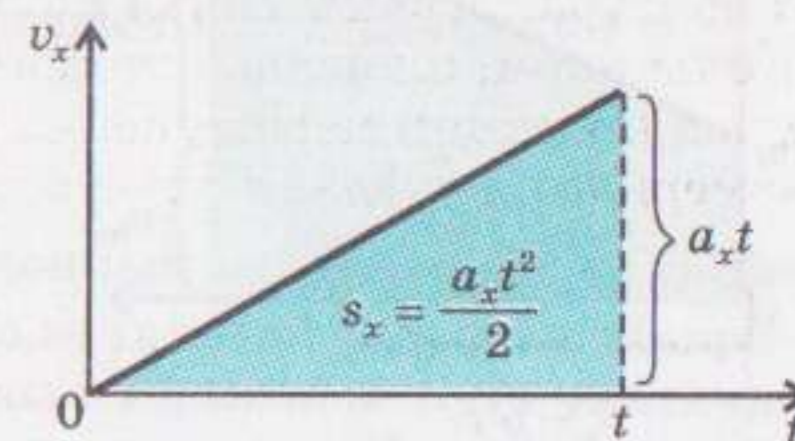
Выведите формулу $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$ для зависимости от времени проекции перемещения при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости и докажите, что $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$.

Решение

Площадь фигуры, ограниченной графиком проекции скорости, численно равна модулю проекции перемещения (см. предыдущую задачу).

В данном случае графиком зависимости $v_x(t)$ является отрезок, проходящий через начало координат (рис. 5.3).

Рис. 5.3. График зависимости проекции скорости от времени при равноускоренном движении без начальной скорости



Проекция перемещения численно равна площади окрашенного треугольника.

Фигура, ограниченная графиком $v_x(t)$ и осью t , — это прямоугольный треугольник с катетами t и $a_x t$. Площадь этого треугольника равна $\frac{a_x t^2}{2}$. Следовательно, $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$.

Время t можно выразить через проекции скорости и ускорения, пользуясь формулой $v_x = a_x t$, откуда следует, что $t = \frac{v_x}{a_x}$.

Подставляя это выражение для t в формулу $s_x = \frac{a_x t^2}{2}$, получаем $s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}$.

Задача 6. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ С НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ

Выведите формулу $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ для зависимости от времени проекции перемещения при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью.

Докажите, что при таком движении $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t$.

Решение

В этом случае, как мы уже знаем, $v_x = v_{0x} + a_x t$ (см. § 3. Ускорение. Прямолинейное равноускоренное движение).

Фигура, ограниченная графиком $v_x(t)$ и осью t , — это прямоугольная трапеция, состоящая из прямоугольника площадью $v_{0x}t$ и уже знакомого нам треугольника площадью $\frac{a_x t^2}{2}$ (рис. 5.4).

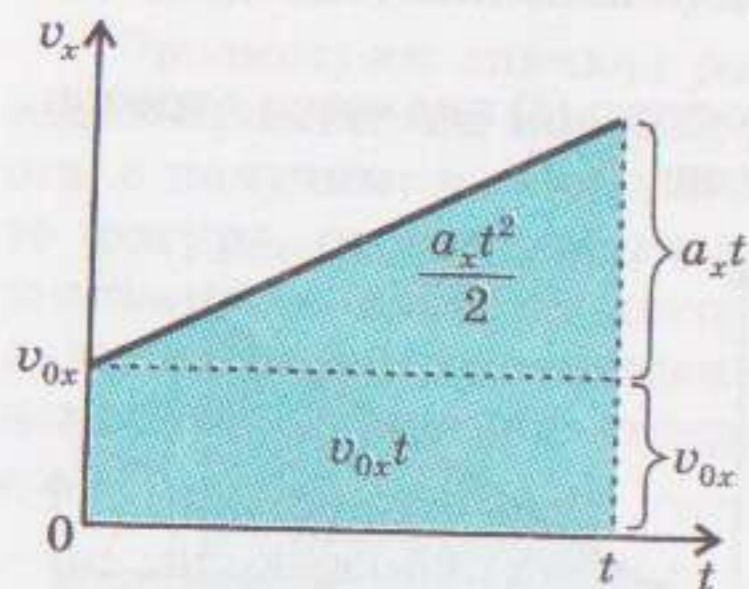


Рис. 5.4. График зависимости проекции скорости от времени при равноускоренном движении с начальной скоростью. Проекция перемещения численно равна площади окрашенной трапеции.

Следовательно, при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$.

Площадь трапеции можно вычислить и как произведение полусуммы оснований (в данном случае v_x и v_{0x}) на высоту (в данном случае t). Следовательно, $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t$.

Отсюда следует, что при равноускоренном движении проекция средней скорости равна среднему арифметическому проекций начальной и конечной скоростей: $v_{ср x} = \frac{s_x}{t} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}$.

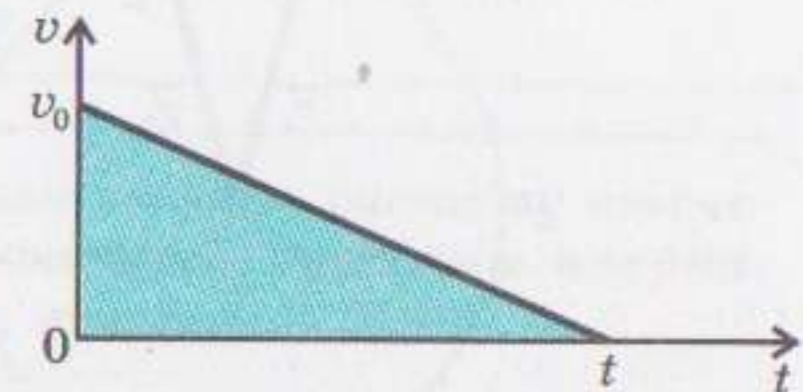
Задача 7. ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ АВТОМОБИЛЯ

Как зависит тормозной путь автомобиля от его начальной скорости v_0 , если ускорение автомобиля при торможении постоянно и равно по модулю a ?

Решение

График зависимости скорости автомобиля от времени приведен на рис. 5.5.

Рис. 5.5. График зависимости скорости автомобиля от времени при торможении до полной остановки



Тормозной путь автомобиля численно равен площади окрашенного треугольника.

Пройденный автомобилем до остановки путь численно равен площади окрашенного прямоугольного треугольника с катетами

v_0 и t , где $t = \frac{v_0}{a}$ (время движения до остановки). Следовательно,

$l = \frac{v_0 t}{2}$. Чтобы выразить пройденный до остановки путь через начальную скорость и ускорение, подставим в эту формулу $t = \frac{v_0}{a}$.

В результате получим $l = \frac{v_0^2}{2a}$.

Обратите внимание: путь, пройденный автомобилем до остановки, пропорционален *квадрату* его начальной скорости. Например, при увеличении скорости в *3 раза* тормозной путь увеличивается в *9 раз*! Вот почему движение на слишком большой скорости представляет опасность для водителя, пассажиров, пешеходов и других автомобилей.

3. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Задача 8. ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Выведите формулу $a_{ц} = \frac{v^2}{r}$ для модуля центростремительного ускорения при равномерном движении по окружности.

Решение

Пусть за малый промежуток времени Δt тело переместилось из точки 1 в точку 2 (рис. 5.6). Обозначим \vec{r}_1 и \vec{r}_2 векторы, проведенные из центра окружности в эти точки. Тогда перемещение тела $\Delta \vec{s} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$. Скорость тела в начальной точке обозначим \vec{v}_1 , а в конечной \vec{v}_2 . Тогда вектор изменения скорости $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$.

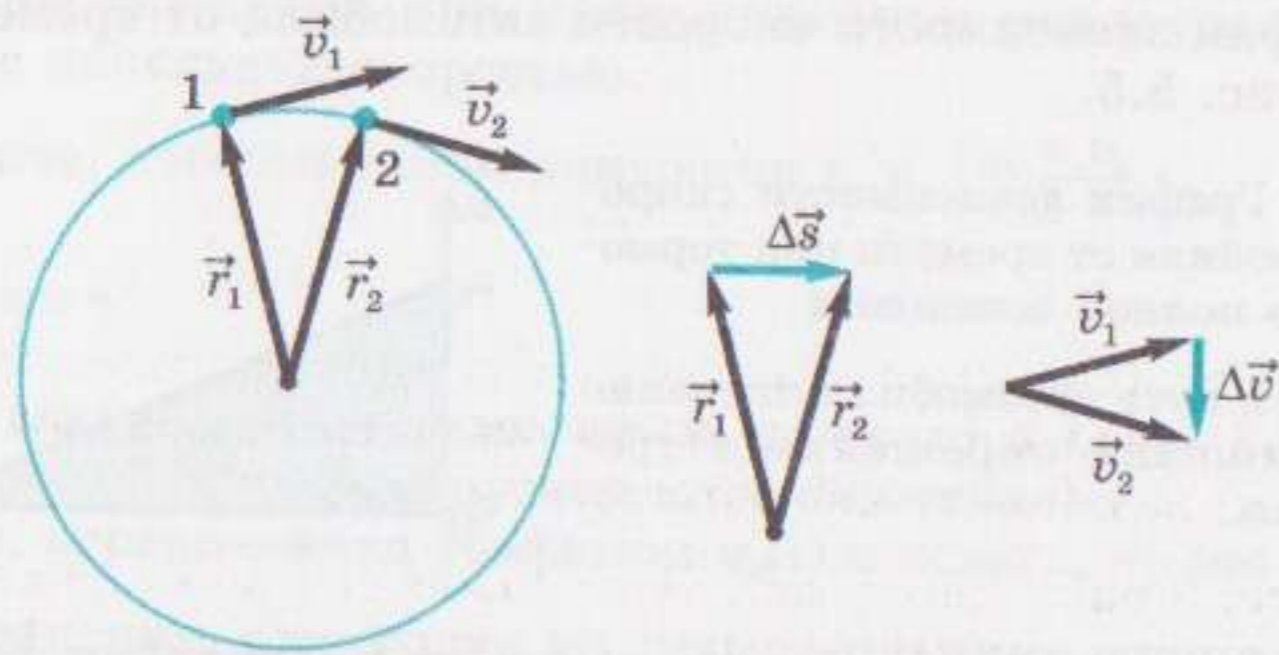


Рис. 5.6. К выводу формулы для расчета модуля центростремительного ускорения

Заметим теперь, что треугольник, образованный векторами $\Delta \vec{v}$, \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , подобен треугольнику, образованному векторами $\Delta \vec{s}$, \vec{r}_1 и \vec{r}_2 (см. рис. 5.6), потому что оба треугольника равнобедренные, а углы при их вершинах равны, так как скорость в каждой точке траектории перпендикулярна радиусу.

Модули векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 равны r , а модули векторов \vec{v}_1 и \vec{v}_2 равны v , поэтому из подобия указанных треугольников получаем $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r}$. Для малого промежутка времени Δt можно принять $\Delta v = a \Delta t$, $\Delta s = v \Delta t$, где a и v — модули ускорения и скорости. Тогда из написанного выше равенства получаем $\frac{a \Delta t}{v} = \frac{v \Delta t}{r}$, откуда

следует, что $\frac{a}{v} = \frac{v}{r}$. Отсюда получаем $a = \frac{v^2}{r}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Пловец находится в воде точно посередине между двумя плотами, плывущими друг за другом по течению реки. Одинаковое ли время ему потребуется, чтобы доплыть до каждого из плотов?

2. Как движутся друг относительно друга два тела, брошенные с разными скоростями, когда оба тела находятся в полете?
3. Как связан пройденный телом путь с площадью фигуры под графиком скорости этого тела?
- 4*. Автомобиль разогнался с ускорением 2 м/с^2 , а затем тормозил с ускорением 3 м/с^2 . Что длиннее — участок разгона или участок торможения? Во сколько раз длиннее?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

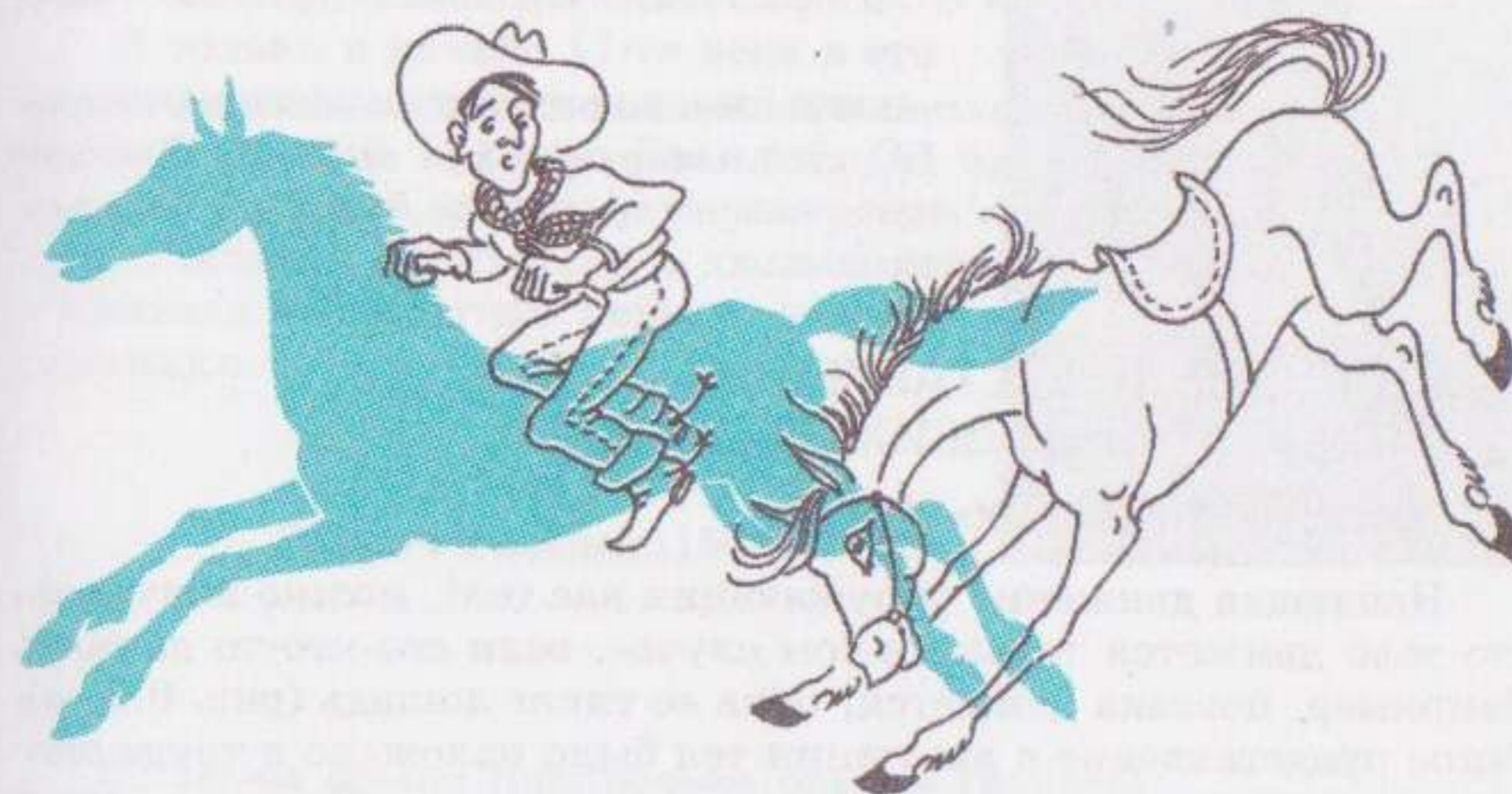
- Для описания движения тела надо выбрать *систему отсчета*, которая состоит из *тела отсчета*, *системы координат*, связанной с телом отсчета, и *часов*.
- *Траекторией* движения тела называют воображаемую линию в пространстве, по которой движется тело. Длина траектории называется *путем*. *Перемещением* тела называют направленный отрезок, проведенный из начального положения тела в его положение в данный момент времени.
- При *криволинейном движении* мгновенная скорость тела в каждой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке; при *движении по окружности* мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена перпендикулярно радиусу окружности, проведенному в эту точку.
- *Ускорением* \vec{a} называют отношение изменения скорости тела к малому промежутку времени, за который это изменение произошло: $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$.
- При *прямолинейном равноускоренном движении* проекция скорости и проекция перемещения зависят от времени следующим образом: $v_x = v_{0x} + a_x t$, $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$.
- При равноускоренном движении без начальной скорости путь $l = \frac{at^2}{2}$.
- Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, все тела падают с постоянным ускорением \vec{g} , направленным вниз. Это ускорение называют *ускорением свободного падения*. Измерения показывают, что $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

- Тело, брошенное горизонтально или под углом к горизонту, движется *по параболе*.
- При *равномерном движении по окружности* ускорение тела направлено к центру окружности. Это ускорение называют *центростремительным ускорением*. Модуль центростремительного ускорения $a_{ц} = \frac{v^2}{r}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «КИНЕМАТИКА»

- 1*. Автомобиль сделал три полных круга по кольцевому шоссе диаметром 1 км. Какова в этом случае длина траектории?
- 2*. При каком движении путь равен модулю перемещения? Может ли путь быть меньше модуля перемещения?
- 3*. Скорость моторной лодки относительно воды 6 км/ч, а скорость течения — 2 км/ч. Во сколько раз быстрее движется лодка по течению, чем против течения?
- 4*. Из поселка А в поселок Б, расположенные на берегу реки, одновременно отправились плот и моторная лодка. Скорость лодки относительно воды в 2 раза больше скорости течения. Успеет ли лодка доплыть от А до Б и вернуться в А за то время, пока плот плывет от А до Б?
- 5*. Шар, двигаясь без начальной скорости, скатился с наклонной плоскости длиной 1 м за 2 с. Какой путь прошел шар за первую секунду движения?
- 6*. Тело свободно падает без начальной скорости. Какое расстояние пролетит тело за первую секунду движения? За вторую? За третью? Для упрощения расчетов примите ускорение свободного падения равным 10 м/с^2 .
- 7*. Чему равно ускорение тела, брошенного под углом к горизонту, в верхней точке траектории? Чему равен в этой точке траектории угол между скоростью и ускорением?
- 8*. Тело, брошенное горизонтально со скоростью 1 м/с, упало на землю через 1 с после броска. С какой высоты было брошено тело? Есть ли в условии задачи лишние данные? Обоснуйте свой ответ. Для упрощения расчетов примите ускорение свободного падения равным 10 м/с^2 .
- 9*. Период обращения тела по окружности равен 1 ч. Чему равна частота обращения?
- 10*. Чему равна скорость точек земной поверхности на экваторе, обусловленная вращением Земли вокруг своей оси?

Глава 2 ДИНАМИКА



Раздел механики, в котором изучают, как взаимодействие тел влияет на их движение, называют динамикой.

Взаимодействия тел описываются с помощью сил, действующих между телами. В этой главе мы познакомимся с основными свойствами сил тяготения, упругости и трения.

Полная система законов динамики была сформулирована английским ученым Исааком Ньютоном. Эти законы назвали тремя законами Ньютона.

Использование законов Ньютона и закономерностей для сил позволяет в принципе решить основную задачу механики, то есть определить положение тела в любой момент времени, если известны начальное положение тела и его скорость.

§ 6. ЗАКОН ИНЕРЦИИ — ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Ранние представления о причинах движения тел
2. Закон инерции и явление инерции
3. Инерциальные системы отсчета и первый закон Ньютона

Долгое время люди были уверены в том, что для поддержания движения тела необходимо постоянно прикладывать к нему силу.

Это представление о движении радикально изменил итальянский ученый Галилей, открыв закон инерции. Ньютон включил этот закон в систему законов динамики как первый из ее законов.

1. РАННИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИЧИНАХ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

ДВИЖЕНИЕ «ЗЕМНЫХ» ТЕЛ

Наблюдая движение окружающих нас тел¹, можно подумать, что тело движется только в том случае, если его что-то движет. Например, повозка движется, пока ее тянет лошадь (рис. 6.1, а). Такое представление о движении тел было изложено в труде знаменитого древнегреческого ученого Аристотеля «Физика», что в переводе с греческого означает «Природа».

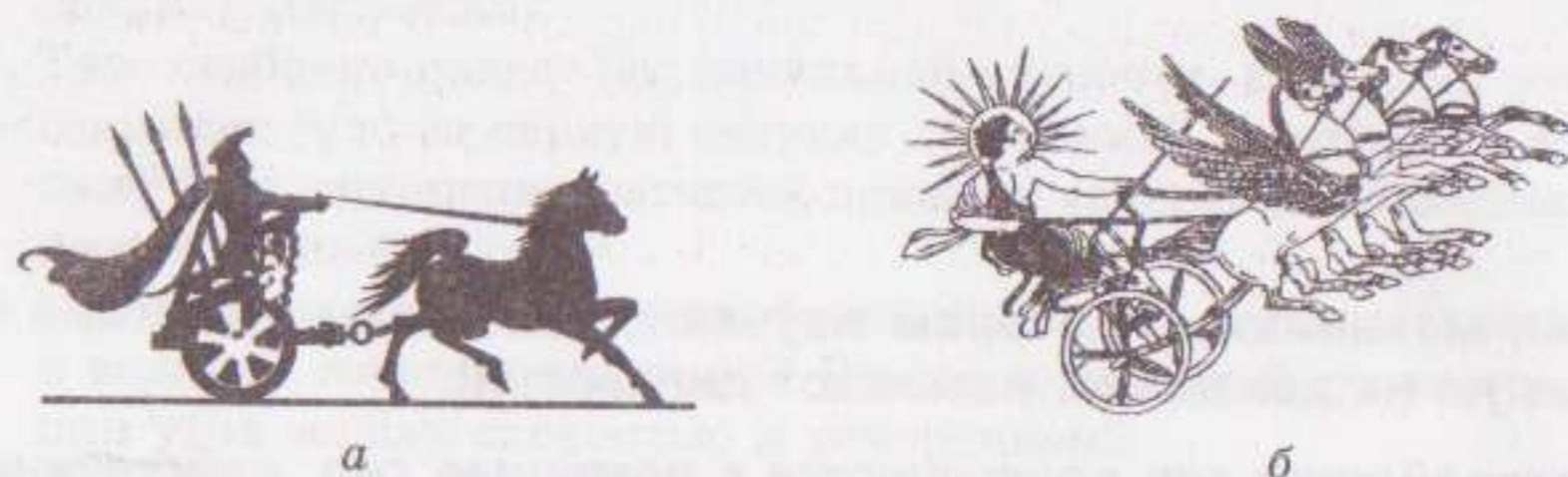


Рис. 6.1. Ранние представления о причинах движения: а — «земных» тел; б — небесных тел

ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Движение небесных тел — Солнца, Луны, планет и звезд — отличается от движения «земных» тел тем, что оно никогда не прекращается. А поскольку видимых причин для этого вечного

¹ Мы называем их условно «земными» телами, чтобы отличить от рассматриваемых далее небесных тел.

движения нет, его объясняли действием «божественных сил». Например, древние греки считали, что бог солнца Гелиос в лучезарном венце едет по небу на колеснице, запряженной золотыми конями (рис. 6.1, б).

2. ЗАКОН ИНЕРЦИИ И ЯВЛЕНИЕ ИНЕРЦИИ

В правильности учения Аристотеля никто не сомневался две тысячи лет.

И только в начале 17-го века в его правильности усомнился великий итальянский ученый Галилео Галилей. Он поставил опыты, которые опровергли представление Аристотеля о движении и привели к открытию первого закона динамики.



Галилео Галилей (1564—1642)

Поставим опыты (повторение опытов Галилея)

Повторим опыты, которые около четырехсот лет назад привели Галилея к открытию закона инерции.

Пусть шар скатывается по наклонной плоскости вниз. Мы увидим, что скорость шара увеличивается (рис. 6.2, а). Если же толкнуть шар, чтобы он катился по наклонной плоскости вверх, то его скорость будет уменьшаться (рис. 6.2, б). Естественно предположить, что, если шар будет катиться по горизонтальной плоскости, его скорость должна оставаться неизменной (рис. 6.3).

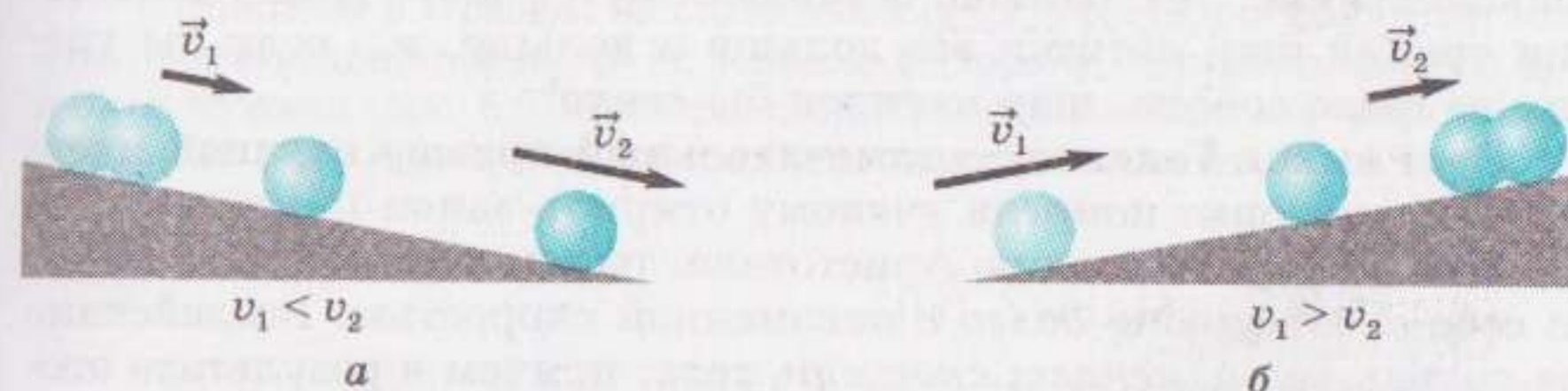


Рис. 6.2. Движение шара по наклонной плоскости: а — движение вниз; б — движение вверх

На рисунках показаны последовательные положения шара через равные промежутки времени.

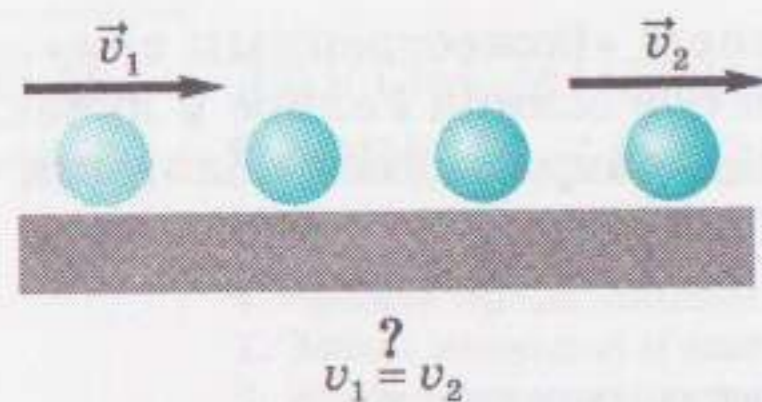


Рис. 6.3. Движение шара по горизонтальной плоскости

Будет ли оставаться скорость шара неизменной?

Однако, ставя опыты, мы увидим, что при движении по горизонтальной плоскости¹ шар, в конце концов, всегда останавливается. Но при этом путь, пройденный шаром до остановки, существенно зависит от свойств поверхности.

Если она посыпана песком, шар остановится, пройдя совсем небольшой путь; если она покрыта тканью, шар пройдет до остановки больший путь; по гладкому же стеклу шар будет катиться очень долго (рис. 6.4).

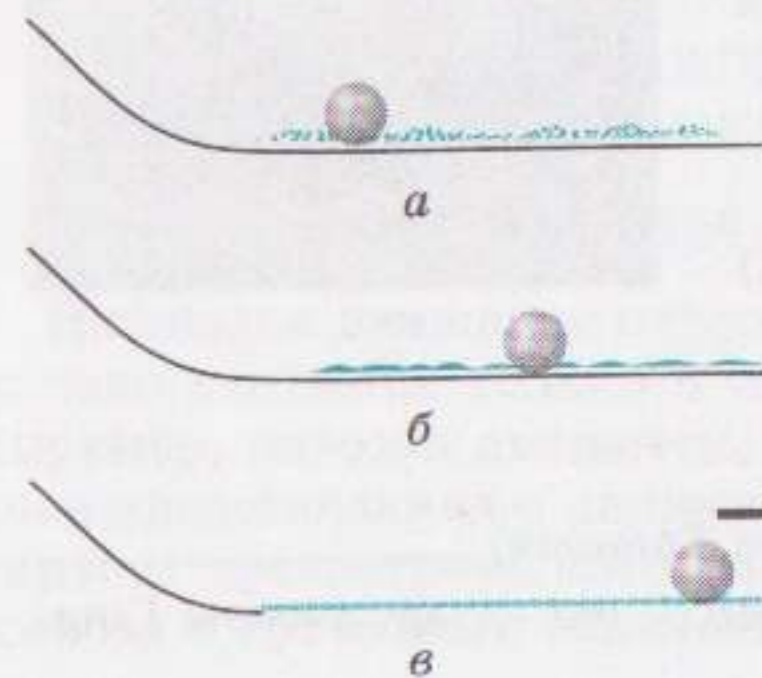


Рис. 6.4. Путь, пройденный шаром до остановки при движении по горизонтальной поверхности: а — по песку; б — по ткани; в — по стеклу

ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИЧИНА НЕ НУЖНА!

Из описанных опытов Галилей сделал очень важный вывод: уменьшение скорости шара при движении по горизонтальной плоскости обусловлено *трением* между шаром и плоскостью: чем больше трение, тем раньше останавливается шар. При уменьшении трения шар катится все дольше и дольше, и... если бы трения не было совсем, шар катился бы *вечно!*

Этот вывод Галилея — замечательный пример научной идеализации, которая помогла ученому открыть закон природы.

Итак, вопреки учению Аристотеля, тело может двигаться само по себе *сколь угодно долго* с неизменной скоростью. Воздействие же других тел *изменяет скорость* тела, причем в результате этого воздействия скорость тела может как увеличиваться, так и уменьшаться, а может изменяться только по направлению.

¹ Горизонтальность плоскости можно проверить, например, с помощью специального прибора — уровня.

ДВИЖЕНИЕ ЗЕМНЫХ И НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ПОДЧИНЯЕТСЯ ОДНИМ И ТЕМ ЖЕ ЗАКОНАМ

Сопоставив движение шара по горизонтальной плоскости с «вечным» движением небесных тел, Галилей нашел разгадку непрекращающегося движения небесных тел: в космическом пространстве просто нет трения!

Как мы увидим позже (см. § 11. *Всемирное тяготение*), характер движения планет обусловлен силой притяжения со стороны Солнца. Но при движении планеты по окружности эта сила направлена перпендикулярно скорости планеты и поэтому она не «толкает» планету вперед, а *искривляет* ее траекторию: можно сказать, что сила притяжения Солнца подобна туго натянутому канату, который все время удерживает планету на ее круговой орбите.

Так Галилей первым обнаружил единство законов природы: движение всех тел — и земных, и небесных — подчиняется *одним и тем же законам*.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ

Открытый Галилеем закон получил название закона инерции.

Закон инерции: если на тело не действуют другие тела, скорость тела не изменяется.

Заметим, что в такой формулировке закон инерции неточен, потому что для описания движения тела, как мы знаем, надо указать систему отсчета, в которой рассматривается движение. Это мы сделаем чуть позже (см. ниже раздел «*Инерциальные системы отсчета и первый закон Ньютона*»), а пока будем считать, что закон инерции в приведенной формулировке с хорошей точностью выполняется в системе отсчета, связанной с Землей.

Способность тел сохранять свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела, называют *явлением инерции*.

Поставим опыты

1. Положим в стоящую на столе тележку металлический шар. Если толкнуть тележку, шар покатится по тележке в сторону, противоположную движению тележки (рис. 6.5). Это происходит вследствие явления инерции: шар сохраняет свою (равную нулю) скорость относительно Земли.

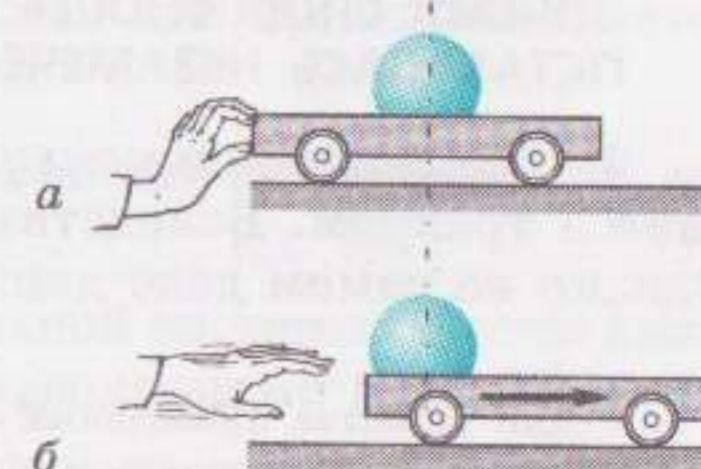


Рис. 6.5. Демонстрация явления инерции: а — тележку с массивным шаром толкают рукой; б — вследствие инерции шар катится по тележке в сторону, противоположную движению тележки

2. Положим на пустой стакан гладкий кусок картона или пластика (можно использовать, например, телефонную карточку), а сверху на него — монету. Если щелкнуть по картону, он слетит со стакана, а монета со звоном упадет в стакан (рис. 6.6). Происходит это вследствие явления инерции: монета не движется с картоном, потому что сохраняет свою скорость относительно Земли.

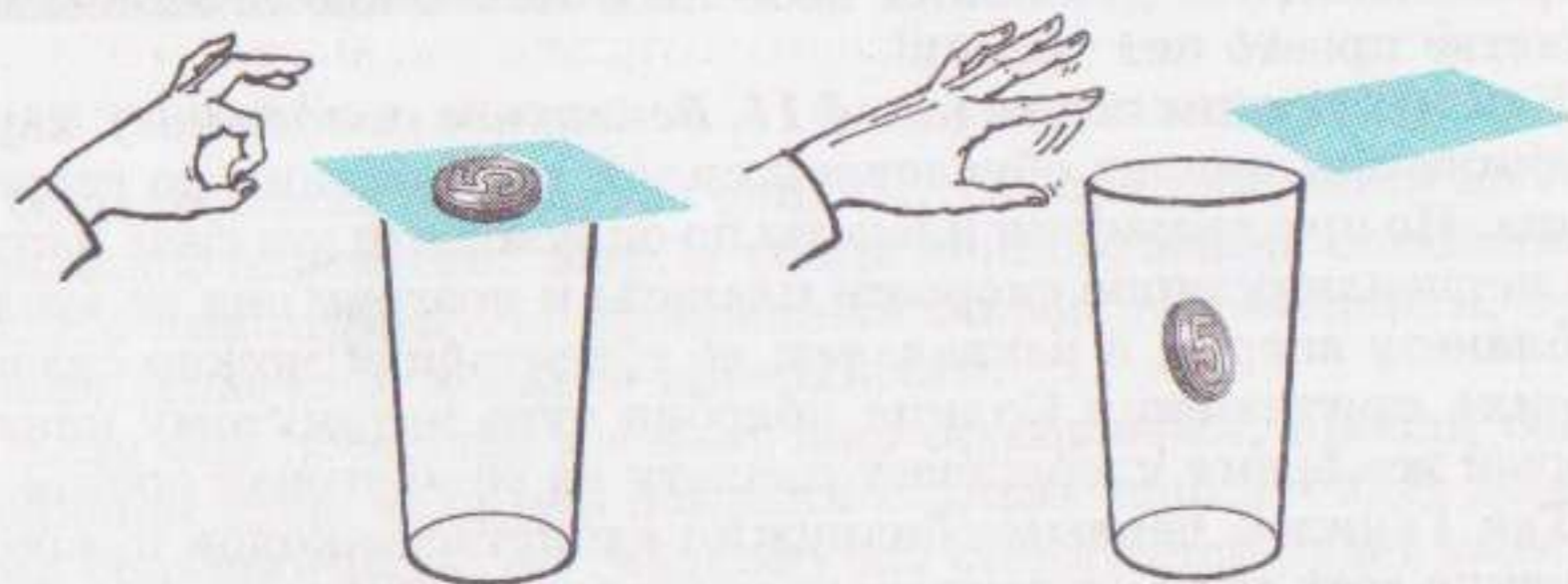


Рис. 6.6. Демонстрация явления инерции: при щелчке картон слетает со стакана, а монета падает в стакан

3. Подвесим массивный металлический шар на нити, которая выдерживает вес шара с небольшим «запасом», и такую же нить прикрепим к шару снизу¹ (рис. 6.7, а). Если теперь потянуть за нижнюю нить плавно, то разорвется верхняя нить (рис. 6.7, б), так как она уже натянута весом шара. Но при резком рывке разорвется нижняя нить (рис. 6.7, в), так как из-за явления инерции шар не успеет сдвинуться, чтобы растянуть верхнюю нить.

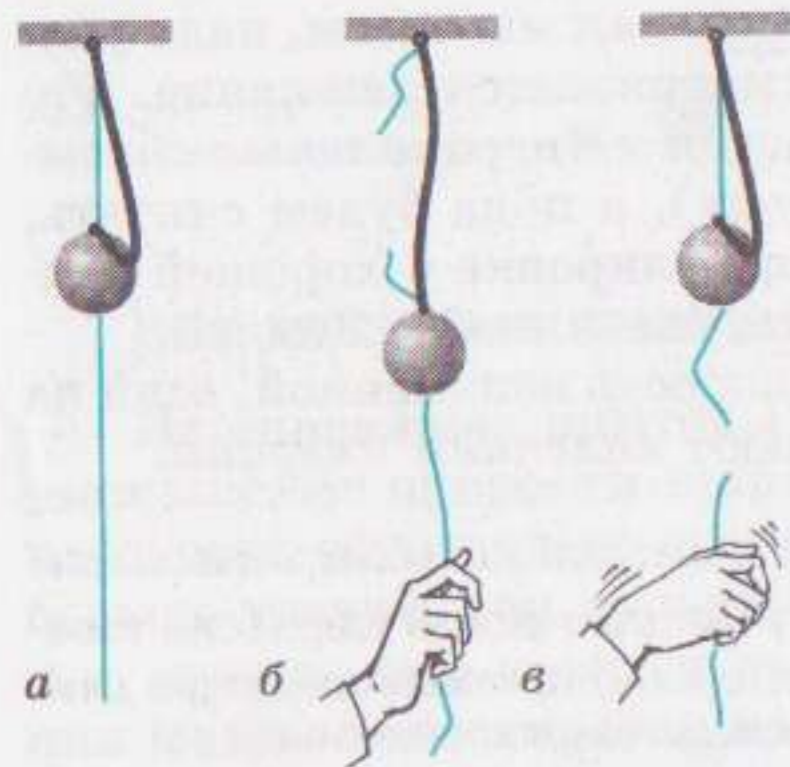


Рис. 6.7. Демонстрация явления инерции: а — массивный шар висит на нити, к шару подвязана такая же нить; б — если плавно потянуть за нижнюю нить, то оборвется верхняя; в — если резко дернуть за нижнюю нить, то она и оборвется

ПОЧЕМУ СПОСОБНОСТЬ ТЕЛ СОХРАНЯТЬ ДВИЖЕНИЕ ОСТАВАЛАСЬ НЕЗАМЕЧЕННОЙ ТАК ДОЛГО?

Любое движение в окружающем нас «земном» мире сопровождается трением. Вследствие трения движение как бы исчезает. Однако на самом деле движение не исчезает, а переходит в дру-

¹ Для удобства проведения опыта шар во избежание падения подвязывают свободно свисающим прочным шнуром.

гую форму: из-за трения тела нагреваются, а это значит, что увеличивается скорость движения молекул, из которых состоит тела. Таким образом, в результате трения упорядоченное движение тела как целого превращается в хаотическое движение молекул (см. § 33. Второй закон термодинамики. Охрана окружающей среды). Когда люди научились значительно уменьшать силу трения, способность тел сохранять движение стала очевидной (рис. 6.8).

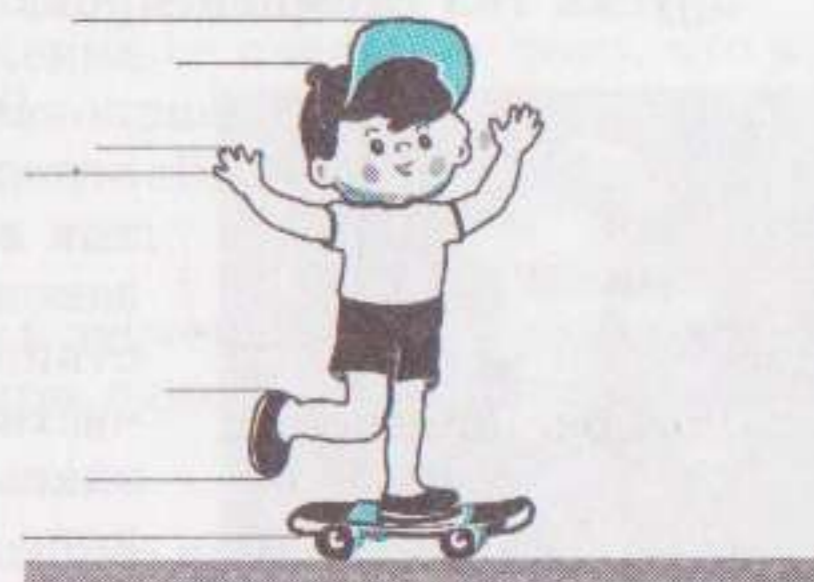


Рис. 6.8. Движение при малой силе трения

Тело может двигаться само по себе довольно долго.

3. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Как показывает опыт, закон инерции с хорошей точностью выполняется в системе отсчета, связанной с Землей.

Однако он выполняется далеко не в любой системе отсчета. Из наблюдений и опытов мы видим, что есть такие системы отсчета, в которых закон инерции не выполняется совсем (например, в разгоняющемся и тормозящем автомобиле пассажиров без действия внешних сил «бросает» то назад, то вперед), есть такие, в которых он выполняется весьма приближенно (например, система отсчета, связанная с почти равномерно движущимся поездом), и такие, в которых он выполняется с большой точностью (например, система отсчета, связанная с Землей).

Продолжая мысленно эту цепочку, можно представить такую систему отсчета, в которой закон инерции выполняется точно.

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

Таким образом, понятие инерциальной системы отсчета является еще одним примером научной идеализации (см. *Физика и научный метод познания*).

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Уточним теперь формулировку закона инерции так, чтобы в ней говорилось и о системах отсчета, в которых этот закон выполняется.

Существуют системы отсчета (называемые инерциальными), относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.



Закон инерции получил название *первого закона Ньютона*, так как Ньютон включил его в систему основных законов механики, названных впоследствии тремя законами Ньютона, в качестве первого из них. Но Ньютон признавал за Галилеем честь открытия закона инерции.

Исаак Ньютон (1643—1727)

Сколько существует различных инерциальных систем отсчета?

Пусть некоторая система отсчета движется относительно инерциальной системы отсчета равномерно и прямолинейно. Тогда и в этой системе отсчета все тела, не подверженные действию других тел, сохраняют свою скорость неизменной. Значит, эта система отсчета также является инерциальной. Следовательно, существует *бесконечно много* инерциальных систем отсчета.

Все инерциальные системы отсчета *равноправны* в том смысле, что во всех инерциальных системах отсчета (и только в них!) изменение скорости тела обусловлено действием на это тело других тел.

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

Представим себе салон самолета, летящего с постоянной скоростью. Если не смотреть в окно и отвлечься от звука двигателей, невозможно определить, летит самолет или стоит на земле (рис. 6.9).

Таким образом, *понятия покоя и движения являются относительными*: если в одной инерциальной системе отсчета тело покоится, то в другой инерциальной системе, движущейся относительно первой, это же самое тело движется с постоянной скоростью.

Рис. 6.9. Система отсчета, связанная с самолетом

Пассажир не чувствует, что самолет летит с большой скоростью.



Относительность покоя и движения — следствие того, что все инерциальные системы отсчета *равноправны*.

Принципиальную невозможность обнаружить «абсолютное движение» можно сформулировать так:

во всех инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.

Это утверждение получило название *принципа относительности Галилея*.

Из книги Галилея

Очень образно о принципе относительности написал сам Галилей.

«Уединитесь с кем-либо из друзей в просторном помещении под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими мелкими летающими насекомыми; пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками; подвесьте, кроме того, наверху ведро, из которого вода капля за каплей будет капать в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу.

Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как насекомые с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать одинаково во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая другу какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у вас не возникает никакого сомнения в том, что, пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так.

Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки) вы не обнаружите ни малейшего изменения во всех названных явлениях

и поэтому ни по одному из них не сможете установить, движется корабль или стоит неподвижно... И причина согласованности всех этих явлений в том, что движение корабля является общим для всех находящихся в нем предметов, так же как и для воздуха: потому-то я и сказал, что вы должны находиться под палубой...»

Поставим опыт

Повторим в миниатюре описанный Галилеем опыт. Поместим на тележку сосуд с водой, из которого вода капает в размещенный на той же тележке другой сосуд с узким горлышком (рис. 6.10). Мы увидим, что капли будут попадать в подставленный сосуд и в том случае, когда тележка движется равномерно (для уменьшения трения можно использовать стол на воздушной подушке).

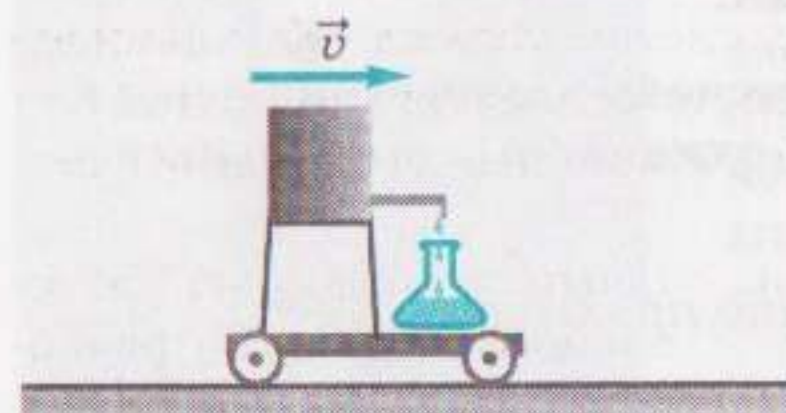


Рис. 6.10. Демонстрация принципа относительности Галилея

Капли попадают в подставленный сосуд независимо от того, покоится тележка или движется равномерно и прямолинейно.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Первый закон Ньютона:** существуют системы отсчета (называемые инерциальными), относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.
- **Принцип относительности Галилея:** во всех инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Аристотель утверждал, что тело движется только при условии, что его что-то (или кто-то) движет. Каким наблюдениям противоречит это утверждение?
2. Почему скорость шара уменьшается, когда он катится по горизонтальной поверхности?
3. Опишите опыты Галилея с наклонной плоскостью. Какой вывод сделал ученый из этих опытов?
4. В чем состоит явление инерции?
5. Сформулируйте первый закон Ньютона.

6. Приведите примеры явления инерции в природе и в технике.
7. Какие системы отсчета называют инерциальными?
8. В чем состоит принцип относительности Галилея? Проиллюстрируйте ваш ответ примерами.
9. Если встряхнуть мокрый зонт, полетят капли воды. Почему?
10. Почему способность тел сохранять движение оставалась долго незамеченной?
- 11*. Во всех ли системах отсчета выполняется закон инерции? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
- 12*. Почему открытый Галилеем закон инерции называют также первым законом Ньютона?
- 13*. В некоторой инерциальной системе отсчета тело покоится. Как движется это тело в другой инерциальной системе отсчета?
- 14*. Сколько существует инерциальных систем отсчета? Как движется одна инерциальная система отсчета относительно другой?
- 15*. Каков смысл утверждения «все инерциальные системы отсчета равноправны»?
- 16*. Вы едете в вагоне с зашторенными окнами. С помощью каких опытов и наблюдений можно узнать, движется ли вагон равномерно прямолинейно?

1. Система отсчета, связанная с Землей
2. Гелиоцентрическая система мира

В этом параграфе мы рассмотрим, в каких случаях системе отсчета, связанную с Землей, можно считать инерциальной системой отсчета.

Мы расскажем также о борьбе за гелиоцентрическую систему мира и о том, как эта система мира изменила представление о месте человека во Вселенной.

Уникальность разумной жизни на нашей планете по-новому ставит вопрос о месте Человека во Вселенной.

1. СИСТЕМА ОТСЧЕТА, СВЯЗАННАЯ С ЗЕМЛЕЙ

ПОЧЕМУ МЫ НЕ ОЩУЩАЕМ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ?

С давних времен неподвижность земной тверди казалась столь очевидной, что возникал только вопрос: «На чем держится Земля?». Этот вопрос разные народы решали по-разному. В Древней Индии, например, были уверены, что Землю поддерживают четыре слона, которые сами стоят на гигантской черепахе (рис. 7.1). Вопрос же: «На чем держится черепаха?» — почему-то никого не беспокоил...

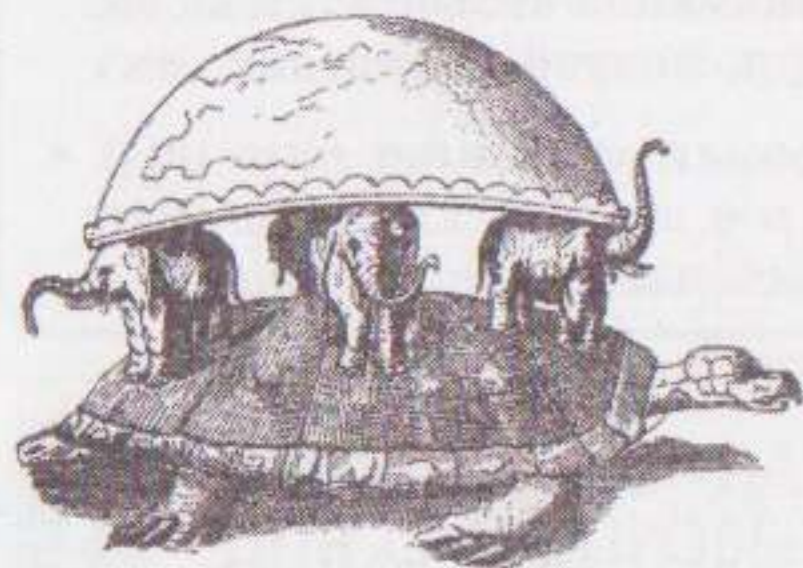
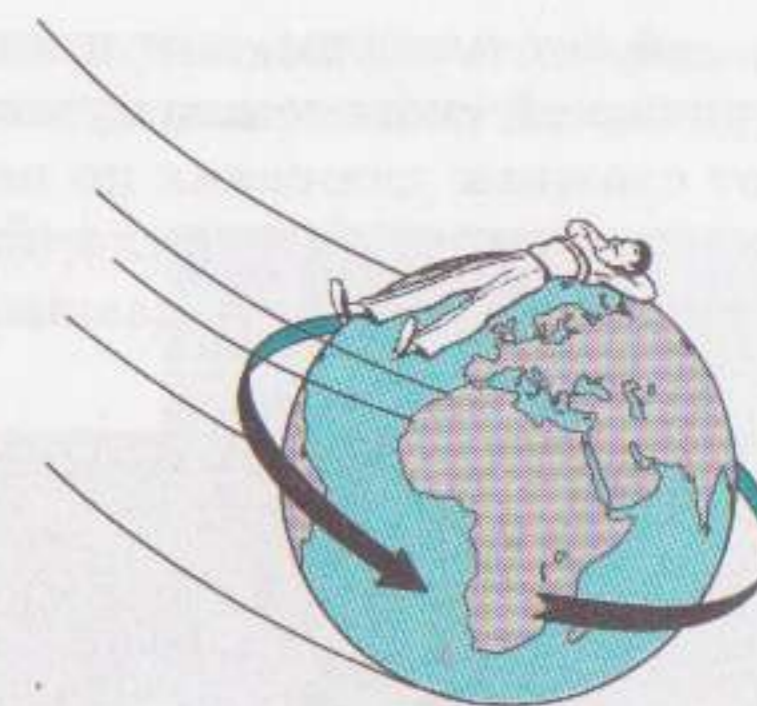


Рис. 7.1. Представление о Земле в Древней Индии

«Очевидные» доводы в пользу неподвижности Земли настолько сильны, что мы и сегодня говорим: «солнце всходит и заходит», хотя понимаем, что солнечный диск движется по небу вследствие суточного вращения Земли вокруг своей оси. И действительно, трудно представить себе, что мы, двигаясь вместе с Землей относительно Солнца, пролетаем за каждую секунду 30 километров в космическом пространстве (рис. 7.2). А ведь, кроме того, мы еще «участвуем» и в суточном вращении Земли! Почему же мы не ощущаем своего движения вместе с Землей?

Рис. 7.2. Почему мы не ощущаем движения Земли?



Ответ на этот вопрос заключается в принципе относительности Галилея: система отсчета, связанная с Землей, является «почти инерциальной». Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В КАКИХ СЛУЧАЯХ СИСТЕМУ ОТСЧЕТА, СВЯЗАННУЮ С ЗЕМЛЕЙ, МОЖНО СЧИТАТЬ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ?

Отличие какой-либо системы отсчета от инерциальной определяется ускорением этой системы отсчета относительно инерциальной.

Центростремительное ускорение Земли при ее движении по орбите вокруг Солнца равно всего $0,006 \text{ м/с}^2$. Ускорение точек земной поверхности, обусловленное суточным вращением Земли, в несколько раз больше (наибольшее оно на экваторе, где составляет $0,034 \text{ м/с}^2$), но и такое ускорение можно обнаружить только специальными приборами. Вот почему для расчета движений тел вблизи земной поверхности (в том числе автомобилей, самолетов, деталей машин и т. п.) в качестве инерциальной системы отсчета вполне можно брать систему отсчета, связанную с Землей.

Однако при рассмотрении движения Солнца и планет систему отсчета, связанную с Землей, нельзя считать инерциальной.

Вопрос о выборе подходящей для этого системы отсчета имеет драматическую историю, о которой мы сейчас расскажем.

ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА

Еще несколько веков назад люди считали, что неподвижная Земля является центром мироздания. Такое представление называется *геоцентрической системой мира*.

Движение Солнца и Луны в геоцентрической системе выглядит довольно просто — эти «главные» небесные светила движутся по окружностям вокруг Земли. Звезды же как бы прикреплены к «небесной сфере», которая тоже вращается вокруг Земли.

А вот планеты, в отличие от Солнца, Луны и звезд, в геоцентрической системе движутся довольно прихотливо: они совершают сложные движения по небу, порой даже поворачивая назад и описывая странные петли (недаром в переводе с греческого «планета» означает «блуждающая») (рис. 7.3).

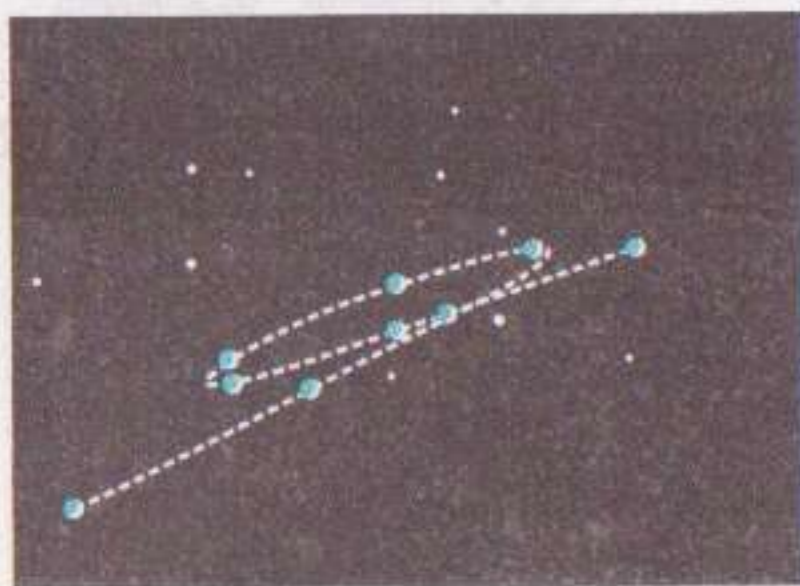


Рис. 7.3. Петля, описываемая планетой Марс на фоне звезд

Кружками обозначены положения планеты, наблюдаемые с промежутком в один месяц.

Пытаясь объяснить движение планет, ученые проявляли много изобретательности: предполагалось, что планеты, вращаясь вокруг «неподвижной» Земли, совершают еще дополнительные сложные движения.

Геоцентрическая система мира принималась без сомнений в течение тысячелетий. Однако не всеми.

2. ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА

АРИСТАРХ

По дошедшим до нас сведениям первым, кто высказал мысль, что Земля не неподвижна, а движется вокруг Солнца, был древнегреческий ученый Аристарх, живший в 3-м веке до нашей эры. Однако эта мысль опередила свое время почти на две тысячи лет: за «нарушение покоя богини Земли» Аристарх был изгнан из Афин.

Но и тем, кто подверг сомнению неподвижность Земли через две тысячи лет после Аристарха, пришлось не легче: кто заплатил за свои убеждения свободой, а кто — и жизнью.

КОПЕРНИК

В 16-м веке польский астроном Николай Коперник, анализируя известные ему данные о движении планет, обнаружил, что, если считать неподвижной не Землю, а Солнце, описание движе-

ния планет очень сильно упрощается: в системе отсчета, связанной с Солнцем, все планеты, включая Землю, движутся по круговым орбитам.

Коперник первым объединил в одну семью Землю и другие планеты, образно назвав их «детьми Солнца».



Николай Коперник (1473—1543)

ЗНАЧЕНИЕ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИРА

Система мира, основанная на представлении, что все планеты (включая Землю) движутся вокруг Солнца, называется *гелиоцентрической*.

Как мы видим, гелиоцентрическая система мира отличается от геоцентрической *только выбором системы отсчета*: в гелиоцентрической системе движение всех планет, включая Землю, рассматривается в системе отсчета, связанной с Солнцем, а в геоцентрической — в системе отсчета, связанной с Землей.

Поэтому, казалось бы, открытие Коперника — всего лишь удачная догадка о выборе системы отсчета, более удобной для описания движения планет. Почему же это «простое» изменение системы отсчета стало одним из самых значительных событий в истории человечества?

Во-первых, *общее свойство* движения всех планет (по орбитам вокруг Солнца) позволило увидеть и *общую причину* такого движения: притяжение планет к Солнцу. (Более подробно об этом рассказано в § 11. *Всемирное тяготение*.)

Во-вторых, переход к гелиоцентрической системе означал переворот в представлении о мироздании: Земля теряла роль «центра Вселенной»!

Почему описание движения планет в гелиоцентрической системе упрощается?

Дело в том, что система отсчета, связанная с Солнцем, с большей точностью является инерциальной, чем система отсчета, связанная с Землей.

Поэтому при рассмотрении движения планет (а также при расчете траекторий космических аппаратов) в качестве инерциальной системы отсчета выбирают такую, в которой начало координат совпадает с центром Солнца, а оси координат направлены на три звезды¹.

ПЕРВЫЙ ФАНТАСТ

После открытия Коперника начался великий спор о месте человека во Вселенной — спор между сторонниками учения Коперника, великими учеными того времени, и противниками этого учения, служителями церкви. Влияние церкви было огромным, но стремление к истине было еще больше: ради истины ученые готовы были жертвовать жизнью.



Вдохновленный учением Коперника итальянский ученый Джордано Бруно высказал грандиозную идею о множественности миров.

Джордано Бруно (1548—1600)

Бруно предположил, что мы не одиноки во Вселенной и что бесчисленные звезды — это солнца, вокруг которых обращаются планеты, также населенные разумными существами. Так что именно Бруно — родоначальник «космической» фантастики.

Отказавшись отречься от своей идеи, Бруно взшел на костер инквизиции и вместе с тем вошел в бессмертие. «Вы выносите мне приговор с большим страхом, чем я его выслушиваю», — сказал он своим судьям.

«А ВСЕ-ТАКИ ОНА ВЕРТИТСЯ!»

Галилей был современником и соотечественником Джордано Бруно. Рискуя жизнью, Галилей большую ее часть отдал обоснованию и разъяснению учения Коперника. Именно в поисках обоснования этого учения Галилей и открыл закон инерции.

¹ Эта система отсчета тоже не является «совершенно инерциальной», так как Солнце движется вокруг центра нашей Галактики со скоростью около 200 км/с, совершая один оборот примерно за 240 миллионов лет. Но ускорение Солнца очень мало.

Когда Галилей был уже в преклонном возрасте, инквизиция под угрозой пыток заставила его отречься от учения Коперника. Однако «отрекаясь», Галилей, согласно легенде, негромко произнес: «А все-таки она вертится!»

НОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕСТЕ ЧЕЛОВЕКА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Наша Земля — огромный «космический корабль», несущий всех нас — несколько миллиардов человек — в безбрежном космическом пространстве. И пока что это *единственная* известная нам обитаемая планета: все попытки обнаружить жизнь на других планетах Солнечной системы или вблизи других звезд оказывались пока безуспешными. Это доказывает, что *жизнь* — исключительно редкое явление даже в масштабах Вселенной.

Это новое знание по-новому изменяет и наше представление о месте человека во Вселенной — теперь уже Человека с большой буквы.

Да, наша Земля — всего лишь «рядовая» планета, движущаяся вокруг «заурядной» звезды на окраине одной из миллиардов известных нам галактик. Но наша планета исключительна тем, что на ней сложились уникальные условия для возникновения жизни. Более того, на Земле возникла *разумная* жизнь. В сравнении с пытливым человеческим мозгом и горячим человеческим сердцем огромные галактики — всего лишь мертвый «газ» из миллиардов звезд! Есть ли где-либо еще во Вселенной Галилей или Пушкин? Пытаются ли где-нибудь еще понять, как устроен мир?

Так, благодаря Человеку наша «маленькая» Земля, летящая в бесконечных просторах космоса, стала «центром познания» Вселенной. И эта уникальность нашей планеты делает бесконечной меру нашей ответственности за жизнь на ней.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Систему отсчета, связанную с Землей, можно считать инерциальной при рассмотрении движений тел вблизи земной поверхности.
- Систему мира, основанную на представлении о неподвижной Земле, находящейся в центре мироздания, называют *геоцентрической*, а основанную на представлении, что все планеты (включая Землю) движутся вокруг Солнца, называют *гелиоцентрической*.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему мы не ощущаем движения Земли?
2. Почему движение «ощущается» больше, когда вы едете на велосипеде, а не в автомобиле, хотя скорость автомобиля относительно дороги намного больше?
3. Что такое геоцентрическая система мира?
4. Что такое гелиоцентрическая система мира? Кто ее предложил?
5. Какой системе мира — геоцентрической или гелиоцентрической — соответствует выражение: «Солнце восходит и заходит»?
6. Чем объясняется движение звезд по небу в гелиоцентрической системе мира?
7. Что общего в движении всех планет в гелиоцентрической системе мира?
- 8*. Опишите различия между геоцентрической и гелиоцентрической системами мира.
- 9*. Для рассмотрения движения каких тел систему отсчета, связанную с Землей, можно считать инерциальной системой отсчета, а для каких — нельзя?
- 10*. В чем состоит значение гелиоцентрической системы мира?
- 11*. Почему описание движения планет в гелиоцентрической системе упрощается по сравнению с геоцентрической системой?
- 12*. Луна движется по ночному небу. А движется ли Земля по небу для астронавта, находящегося на Луне? Учтите, что Луна повернута к Земле все время одной стороной.
- 13*. Что является причиной видимого движения Солнца по небу — суточное вращение Земли вокруг своей оси или движение Земли вокруг Солнца?

§ 8.

СИЛЫ В МЕХАНИКЕ. СИЛА УПРУГОСТИ

1. Взаимодействия и силы
2. Сила упругости
3. Закон Гука. Измерение сил с помощью силы упругости

Взаимодействие тел описывают с помощью сил. В механике рассматриваются три вида сил: силы всемирного тяготения, силы упругости и силы трения.

Мы дадим краткий обзор этих сил и более подробно рассмотрим силу упругости.

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СИЛЫ

Согласно первому закону Ньютона тело, не подверженное действию других тел, движется в инерциальной системе отсчета¹ с постоянной (по модулю и направлению) скоростью, то есть без ускорения. Следовательно,

ускорение тел обусловлено их взаимодействием друг с другом.

Взаимодействие тел описывают с помощью сил, действующих между телами, так что

сила — это мера взаимодействия тел.

Используя понятие силы, мы можем сказать, что ускорение тела обусловлено действующими на это тело силами.

Силы являются векторными величинами — каждая сила характеризуется модулем и направлением.

Кроме того, каждая сила имеет определенную точку приложения.

На чертежах силы, как и другие векторные величины, обозначают стрелками, причем стрелка начинается в точке приложения силы.

Каждому взаимодействию двух тел соответствуют *две* силы, с которыми тела взаимодействуют друг с другом.

ТРИ ВИДА СИЛ В МЕХАНИКЕ

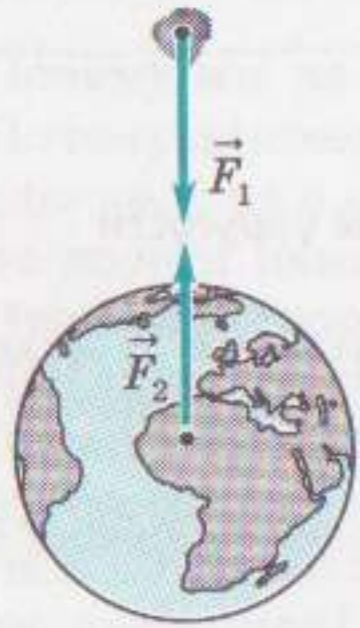
В механике изучаются взаимодействия тел, обусловленные тремя видами сил². Рассмотрим соответствующие примеры.

¹ В дальнейшем мы будем рассматривать движение тел только в инерциальных системах отсчета, не оговаривая этого особо.

² При взаимодействии электрически заряженных или намагниченных тел, а также проводников с электрическими токами учитывают также силы электрического и магнитного взаимодействий.

Примеры

Силы всемирного тяготения



Камень падает с ускорением потому, что его притягивает Земля (рис. 8.1). Камень тоже притягивает Землю.

Рис. 8.1. Силы всемирного тяготения, действующие на камень и на Землю (для наглядности масштаб на рисунке не соблюден)

Силы упругости

Если толкнуть лежащий на столе брусок, он начнет двигаться. Причина изменения скорости бруска — сила упругости, действующая на него со стороны руки. Со стороны бруска на руку также действует сила упругости: мы чувствуем, как брусок давит на руку (рис. 8.2).

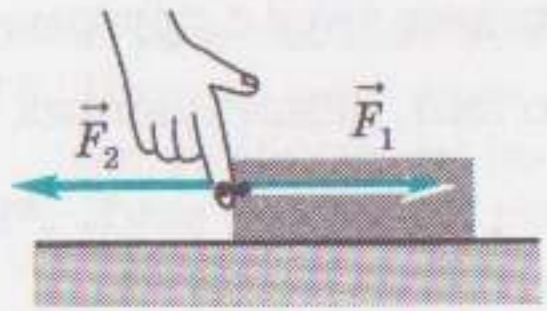


Рис. 8.2. Силы упругости, действующие на брусок и на руку

Силы трения

При движении по столу после толчка скорость бруска будет уменьшаться, потому что на него со стороны стола действует сила трения. На стол со стороны бруска также действует сила трения (рис. 8.3).

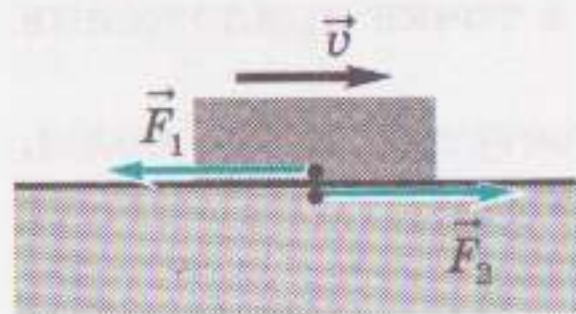


Рис. 8.3. Силы трения, действующие на брусок и на стол

2. СИЛА УПРУГОСТИ

Более подробное знакомство с силами мы начнем с силы упругости.

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

Иногда деформацию тела легко заметить — например, при растяжении или сжатии пружины. Но часто деформация незаметна на глаз. Например, мы видим, как сжимается пружина, если положить на нее книгу, но не замечаем, как под этой же книгой прогибается стол (рис. 8.4). Однако с помощью приборов деформацию стола можно измерить.

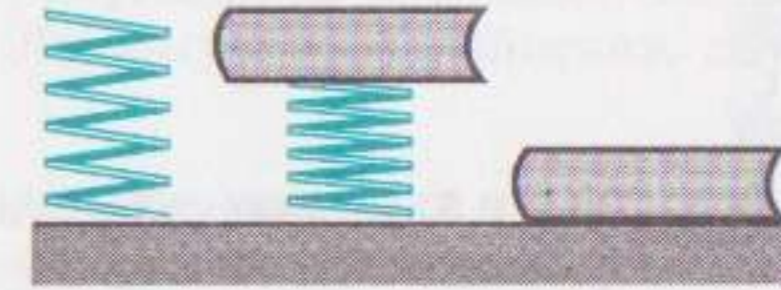


Рис. 8.4. Сравнение деформации пружины и стола под действием одной и той же силы: деформация пружины заметна, а деформация стола незаметна

КАКОВА ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЫ УПРУГОСТИ И КАК НАПРАВЛЕНА ЭТА СИЛА?

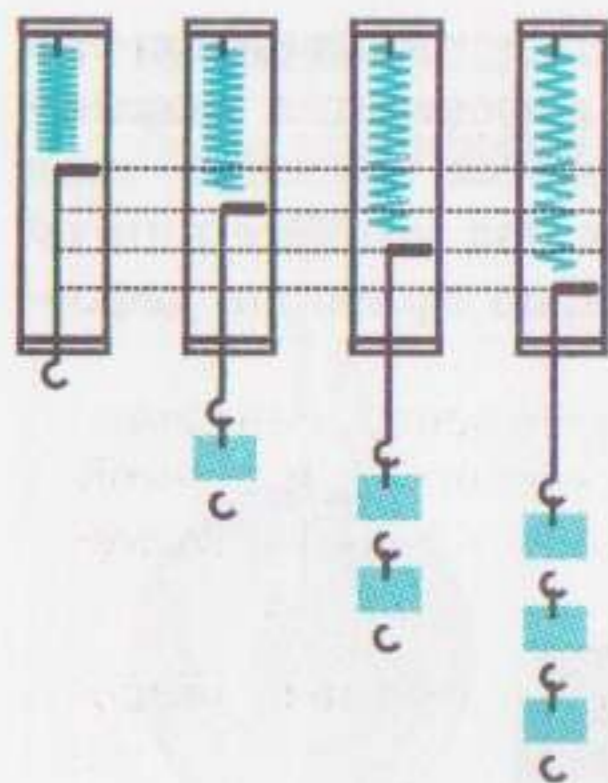
Причиной возникновения силы упругости является взаимодействие молекул тела.

Силы взаимодействия между молекулами таковы, что на малых расстояниях молекулы отталкиваются, а на больших — притягиваются (речь идет о расстояниях, сравнимых с размерами самих молекул). В недеформированном теле молекулы находятся как раз на таком расстоянии друг от друга, когда силы притяжения и отталкивания взаимно компенсируются. Но если мы растягиваем или сжимаем тело, расстояния между молекулами увеличиваются или уменьшаются, поэтому начинают преобладать либо силы притяжения, либо силы отталкивания. В результате и возникает сила упругости.

Сила упругости всегда направлена так, чтобы уменьшить величину деформации тела.

3. ЗАКОН ГУКА. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ С ПОМОЩЬЮ СИЛЫ УПРУГОСТИ

Величина деформации тела зависит от приложенной силы: чем больше сила, тем больше деформация тела. Поэтому *величина деформации может служить мерой силы.*



Поставим опыт

Будем подвешивать к пружине одинаковые гирьки (сделанные из одного и того же металла и имеющие равный объем) и измерять удлинение пружины в зависимости от числа гирек. Мы увидим, что удлинение пружины пропорционально числу гирек (рис. 8.5).

Рис. 8.5. Удлинение пружины при подвешивании к ней различного числа гирек

ЗАКОН ГУКА

Обозначим удлинение пружины $x = l - l_0$, где l — длина растянутой пружины, а l_0 — длина недеформированной пружины (рис. 8.6).

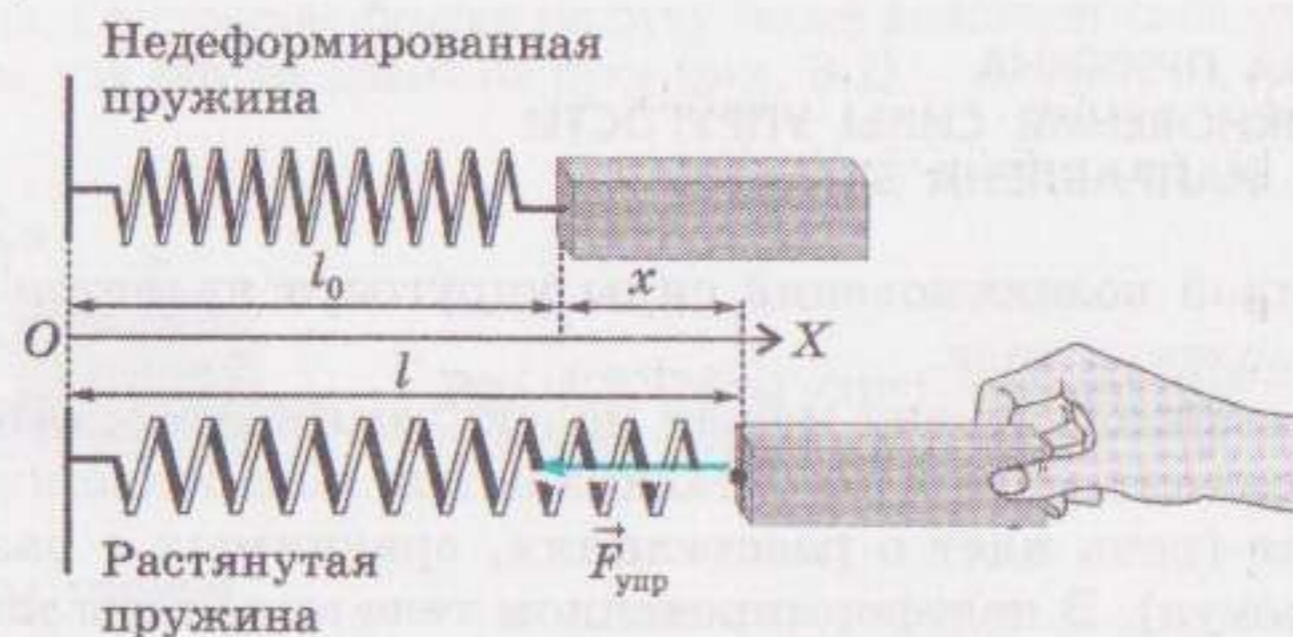


Рис. 8.6. Сила упругости, действующая на тело со стороны пружины. Сила упругости направлена противоположно удлинению пружины

Направим ось OX так, чтобы пружина была растянута в положительном направлении этой оси, то есть $x > 0$. Тогда проекция силы упругости на ось x будет отрицательна, так как растянутая пружина стремится сжаться. Таким образом, $F_x < 0$.

Опыты, подобные описанному выше (см. рис. 8.5), свидетельствуют, что модуль силы упругости пропорционален удлинению пружины. Поэтому с учетом знаков мы можем записать, что

проекция силы упругости $F_x = -kx$.

Это соотношение называется *законом Гука* в честь английского физика Роберта Гука, открывшего этот закон в 17-м веке.

Коэффициент пропорциональности k называется *жесткостью пружины*. Он зависит от материала и формы пружины.

Вы уже знаете, что прибор для измерения сил называется динамометром (см. рис. 8.5). При градуировке (нанесении шкалы) пружинного динамометра используют закон Гука.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Мерой взаимодействия тел является **сила** — векторная величина, характеризующаяся модулем, направлением и точкой приложения. Любому взаимодействию двух тел соответствуют **две** силы.
- В механике изучают три вида сил: **силы всемирного тяготения, силы упругости и силы трения**.
- **Сила упругости** возникает при деформации тела. Причиной возникновения силы упругости является взаимодействие молекул тела. Сила упругости подчиняется **закону Гука**: $F_x = -kx$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое сила? Чем она характеризуется? Какой она является величиной — скалярной или векторной?
2. Как обозначают силы на чертежах? Приведите пример обозначения силы.
3. Чем обусловлено ускорение тела?
4. Какие виды сил рассматриваются в механике? Приведите примеры действия каждой из этих сил.
5. Когда возникает сила упругости?
6. Сформулируйте закон Гука. Как он записывается?
- 7*. Приведите примеры, когда на тело действует одна сила и две силы.
- 8*. Какие силы действуют на вас сейчас?
- 9*. Приведите примеры, подтверждающие, что при взаимодействии тела действуют друг на друга.
- 10*. Может ли сила упругости действовать в том случае, когда деформация тела незаметна на глаз? Подтвердите свой ответ примером.

§ 9. СИЛА, УСКОРЕНИЕ, МАССА. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Соотношение между силой и ускорением
2. Примеры применения второго закона Ньютона

В этом параграфе мы рассмотрим второй закон Ньютона, который называют часто основным законом динамики, потому что он устанавливает соотношение между силой, действующей на тело, и ускорением, которое сообщает эта сила.

1. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СИЛОЙ И УСКОРЕНИЕМ

ПОСТОЯННАЯ СИЛА ВЫЗЫВАЕТ ПОСТОЯННОЕ УСКОРЕНИЕ

Поместим на стол тележку, которая может двигаться по столу практически без трения. Соединим тележку с грузом с помощью нити, переброшенной через блок, а между нитью и тележкой закрепим динамометр (рис. 9.1).

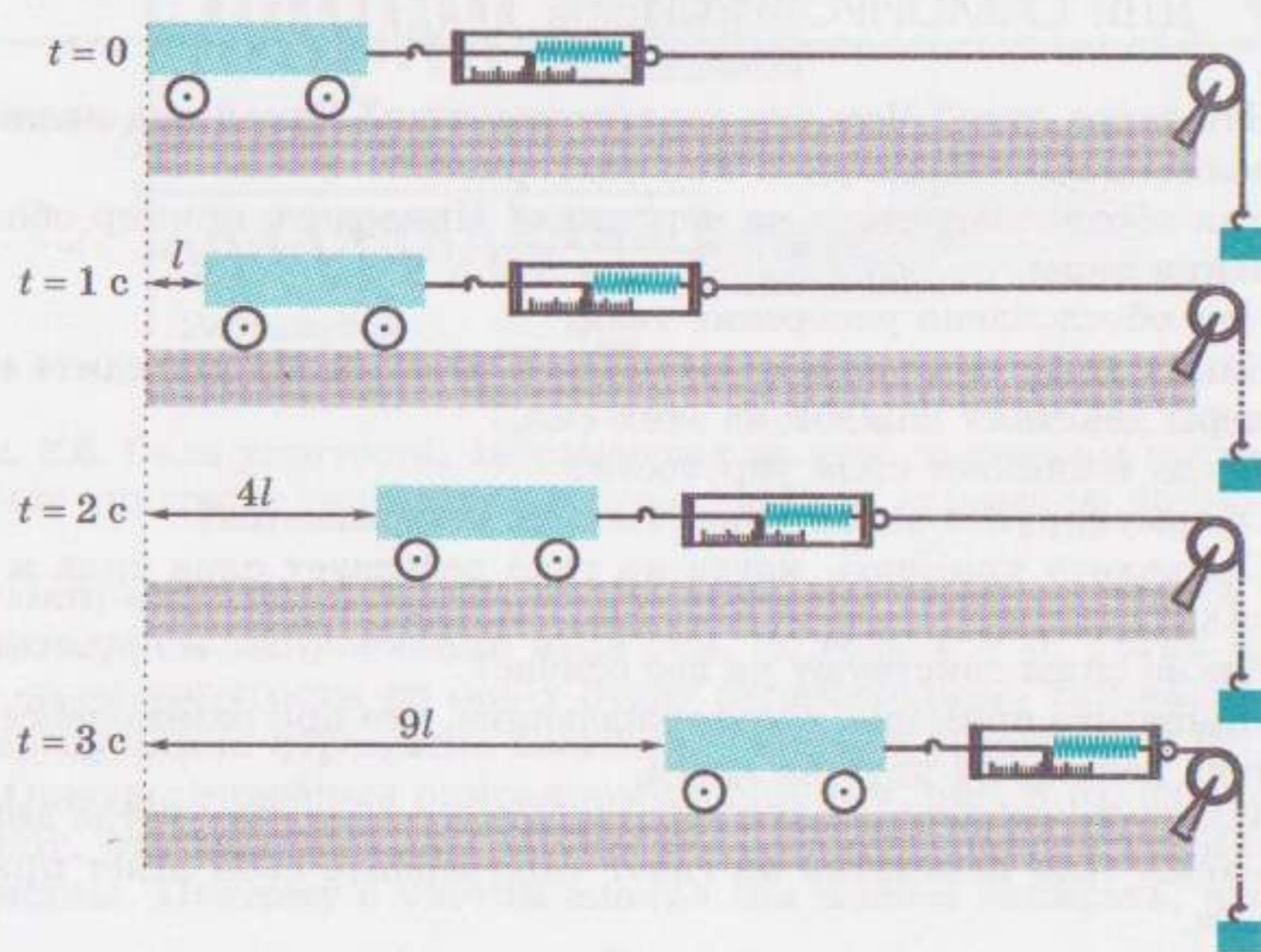


Рис. 9.1. Движение тела под действием постоянной силы

Показаны последовательные положения тела через равные промежутки времени. На трех нижних рисунках нить условно изображена пунктиром, так как груз опускается.

Если отпустить тележку, она начнет двигаться с ускорением. Динамометр показывает, что при движении тележки действующая на нее сила остается *постоянной*.

Чтобы узнать, движется ли тележка с *постоянным* ускорением, вспомним, что при движении с постоянным ускорением без начальной скорости $l = \frac{at^2}{2}$, то есть путь пропорционален квадрату времени движения (см. § 3. Ускорение. Прямолинейное равноускоренное движение). Проверим, будет ли пройденный тележкой путь пропорционален квадрату времени движения. Измеряя пути, проходимые тележкой за 1 с, 2 с, 3 с, мы увидим, что они относятся как $1 : 4 : 9 = 1^2 : 2^2 : 3^2$. Значит, тележка движется с постоянным ускорением. Итак,

под действием постоянной силы тело движется с постоянным ускорением.

КАК ЗАВИСИТ УСКОРЕНИЕ ТЕЛА ОТ ПРИЛОЖЕННОЙ К НЕМУ СИЛЫ?

Начнем увеличивать силу, разгоняющую тележку, подвешивая к нити дополнительные грузы. Мы увидим, что ускорение тележки также увеличивается. Измерения показывают, что

модуль ускорения прямо пропорционален модулю действующей на тело силы.

Прикладывая силу в различных направлениях, мы убедимся в том, что

направление ускорения тела совпадает с направлением силы, действующей на это тело.

МАССА ТЕЛА

Измерим ускорения пустой и нагруженной тележки при действии на них одинаковой силы (модуль силы можно определять по показанию динамометра). Мы увидим, что тележка с грузом под действием той же силы приобретает меньшее ускорение, чем пустая тележка. Это обусловлено свойством тела, которое называется *инертностью*: инертность нагруженной тележки больше, чем пустой.

Меру инертности тела называют его массой.

Массу обозначают обычно буквой m .

Чем больше масса тела, тем большую силу надо приложить, чтобы сообщить телу то же самое ускорение. Например, масса нагруженной тележки больше, чем масса пустой тележки.

Единицей массы в системе СИ является 1 килограмм (кг). Это масса эталона — цилиндра, изготовленного из специального сплава и хранящегося в Международном бюро мер и весов во Франции. Приблизительно можно считать, что 1 кг равен массе 1 л воды (исходя из этого и был выбран эталон).

РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ

Опыт показывает, что всегда можно подобрать одну силу, которая сообщает телу¹ такое же ускорение, как и несколько одновременно действующих на это тело сил. Эта сила называется *равнодействующей*. Из опыта следует, что

равнодействующая равна векторной сумме всех действующих на тело сил.

Обозначим действующие на тело силы \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и т. д. Тогда их равнодействующая $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$, где n — число действующих на тело сил. На рис. 9.2 приведен пример графического нахождения равнодействующей в случае двух сил.

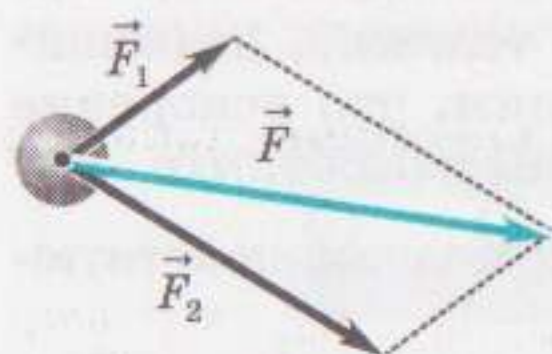


Рис. 9.2. Равнодействующая \vec{F} сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2

Равнодействующая нескольких сил равна векторной сумме этих сил.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Соотношение между равнодействующей всех сил, приложенных к телу, массой тела и его ускорением было сформулировано Ньютоном как *второй* из трех основных законов механики.

Второй закон Ньютона: равнодействующая \vec{F} всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.

Используя второй закон Ньютона, можно найти ускорение тела, если известны действующие на это тело силы. В таком случае второй закон Ньютона записывают часто в виде $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

Второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчета, так как только в них ускорение тела обусловлено действием на данное тело других тел.

¹ Здесь и далее мы будем для простоты рассматривать только случаи, когда тело можно считать материальной точкой.

Единица силы

Единицу силы в системе СИ называют *ньютон* (Н). Сила в 1 ньютон сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с². Таким образом, 1 Н = 1 кг · м/с².

2. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

КАК ЗАВИСИТ СИЛА ТЯЖЕСТИ ОТ МАССЫ ТЕЛА

Ускорение свободного падения \vec{g} сообщает падающему телу сила притяжения к Земле. Эта сила называется *силой тяжести* и обозначается \vec{F}_T . Сила тяжести является проявлением сил всемирного тяготения (см. § 11. *Всемирное тяготение*).

Для падающего тела второй закон Ньютона принимает вид $\vec{F}_T = m\vec{g}$. Отсюда ускорение свободного падения $\vec{g} = \frac{\vec{F}_T}{m}$.

Мы уже знаем, что это ускорение для всех тел одинаково (см. § 3. *Ускорение. Прямолинейное равноускоренное движение*). Следовательно,

сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе (рис. 9.3).

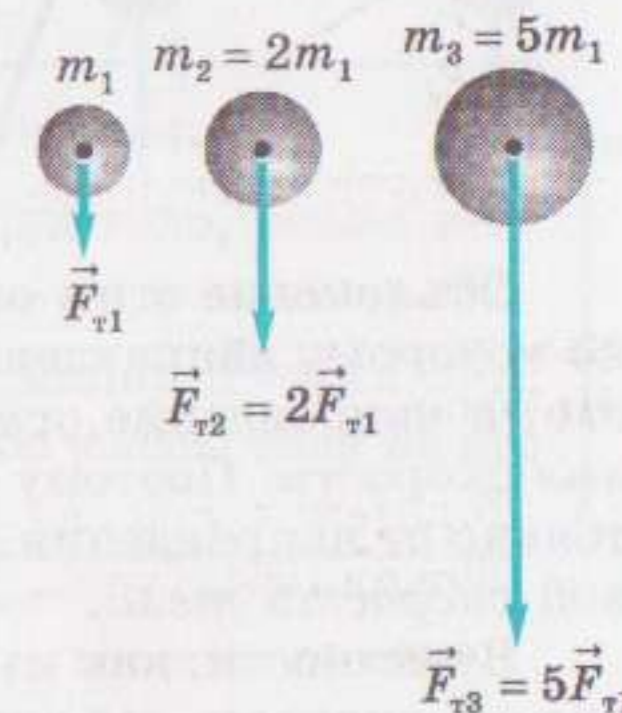


Рис. 9.3. Зависимость силы тяжести от массы тела

ВСЕГДА ЛИ НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛЫ?

Часто на этот вопрос отвечают положительно, приводя довод, что если на тело действует направленная вниз сила тяжести, то тело якобы всегда падает тоже вниз.

В том, что такой ответ ошибочен, легко убедиться с помощью следующего простого опыта.

Поставим опыт

Бросим шарик вниз, затем — вверх, а потом — под углом к горизонту и проследим за движением шарика. Во всех трех случаях на шарик во время движения действует одна и та же сила — сила тяжести, однако в первом случае шарик движется в направлении силы тяжести, во втором случае — противоположно ей, а в третьем — под углом к силе тяжести (рис. 9.4).

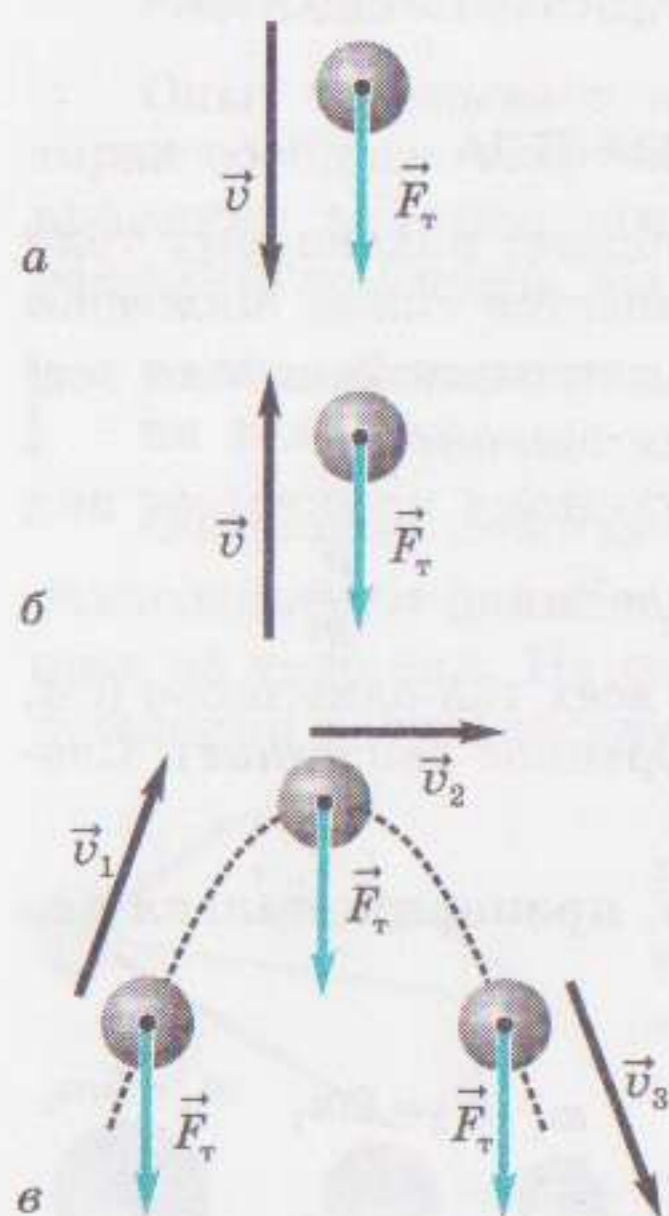


Рис. 9.4. Движение тела под действием силы тяжести:

а — направление начальной скорости совпадает с направлением силы — тело движется прямолинейно, скорость тела увеличивается;

б — начальная скорость направлена противоположно силе — тело движется прямолинейно, скорость тела уменьшается;

в — начальная скорость направлена под углом к силе — тело движется криволинейно, скорость тела изменяется по модулю и по направлению

Объяснение этим опытам дает второй закон Ньютона, согласно которому направление силы определяет не направление скорости, а направление ускорения тела, то есть направление изменения скорости. Поэтому скорость тела в данный момент зависит не только от направления действующей на тело силы, но и от начальной скорости тела.

В частности, как мы сейчас увидим, тело может двигаться так, что его скорость все время остается перпендикулярной действующей на тело силе. И это не такой уж редкий случай — именно так движутся, например, планеты вокруг Солнца.

Движение планет вокруг Солнца

Каждая из планет Солнечной системы движется по траектории, близкой к окружности, в центре которой находится Солнце. Движение планеты приближенно можно считать равномерным, а при равномерном движении по окружности, как мы уже знаем, тело движется с ускорением, направленным к центру окружности (см. § 4.

Криволинейное движение). Значит, на планету при ее движении действует сила, направленная к Солнцу (рис. 9.5). Эта сила является проявлением сил всемирного тяготения (см. § 11. Всемирное тяготение).

Рис. 9.5. Движение планеты под действием силы притяжения к Солнцу

Скорость планеты остается все время перпендикулярной силе, действующей на планету. На рисунке показана только сила, действующая на планету.



Поставим опыт

«Заменим» Солнце магнитом, а планету — стальным шариком: поместим магнит неподалеку от катящегося по столу шарика. Вследствие притяжения к магниту траектория шарика станет криволинейной (рис. 9.6).

Рис. 9.6. Криволинейное движение тела

Притяжение магнита искривляет траекторию движения стального шарика подобно тому, как притяжение Солнца искривляет траекторию планеты. Показана только сила, действующая на шарик.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Массой** тела называется мера инертности тела.
- **Равнодействующая** сил, действующих на тело, равна векторной сумме этих сил.
- **Второй закон Ньютона:** равнодействующая \vec{F} всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как зависит ускорение тела от приложенной к нему силы?
2. Что такое масса тела?
3. Что такое равнодействующая? Как ее найти?
4. Как формулируется второй закон Ньютона?
5. Как зависит сила тяжести, действующая на тело, от его массы?
6. Всегда ли направление движения тела совпадает с направлением действующей на тело силы? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.

§ 10. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ТЕЛ. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

1. Взаимодействие двух тел
2. Примеры применения третьего закона Ньютона

Третий закон Ньютона устанавливает соотношение между силами, с которыми два тела взаимодействуют друг с другом.

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ТЕЛ

КАЖДОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ СООТВЕТСТВУЮТ ДВЕ СИЛЫ

Опыты показывают, что при взаимодействии двух тел *каждое* из них движется с ускорением. А это значит, что

при взаимодействии тел на *каждое* из них действует сила со стороны другого тела¹.

Поставим опыт

Предложим двум соперникам разной массы соревноваться в перетягивании каната, стоя на тележках (можно использовать скейтборды). Мы увидим, что оба соперника движутся с ускорением, причем не имеет значения, выбирают ли веревку, перехватывая ее руками, оба соперника или только один из них (рис. 10.1).

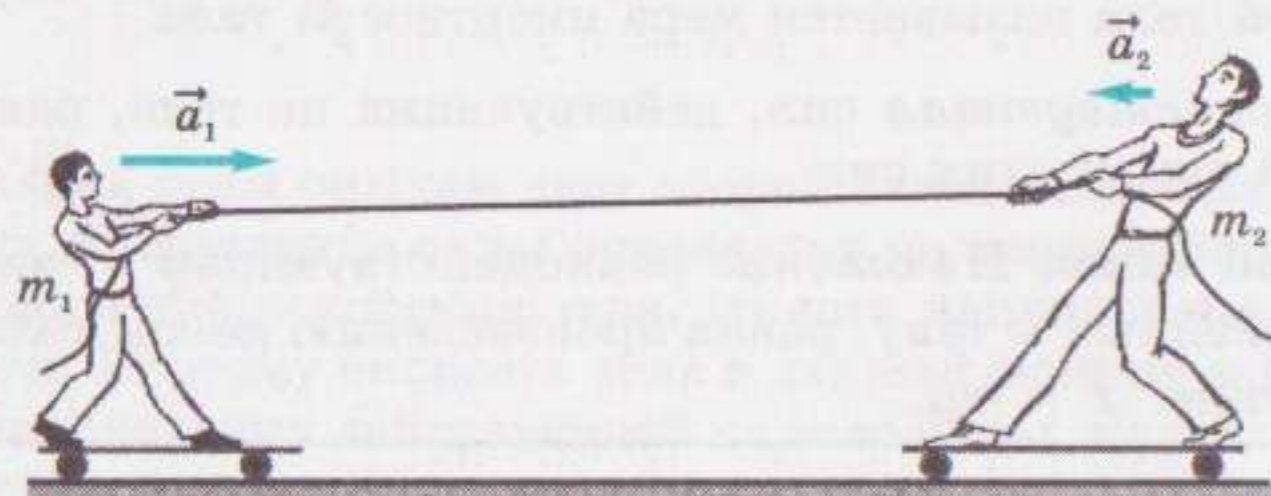


Рис. 10.1. При взаимодействии двух тел *каждое* из них движется с ускорением

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Многочисленные опыты показывают, что при всех видах взаимодействий ускорения взаимодействующих друг с другом тел

обратно пропорциональны массам этих тел: $\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$.

¹ Само слово «ВЗАИМОдействие» говорит о том, что «взаимость» при взаимодействии тел друг на друга была давно уже подмечена людьми.

Пример

Если в перетягивании каната соревнуются десятиклассник и первоклассник, то ускорение первоклассника будет во столько раз *больше* ускорения десятиклассника, во сколько раз масса первоклассника *меньше* массы десятиклассника.

Из соотношения $\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$ с учетом того, что ускорения тел направлены противоположно, получаем $m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2$.

Согласно второму закону Ньютона $m_1 \vec{a}_1 = \vec{F}_1$ и $m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_2$, где \vec{F}_1 — сила, действующая на первое тело, а \vec{F}_2 — на второе. Поэтому из соотношения $m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2$ следует, что $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Это и есть

третий закон Ньютона: тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

СВОЙСТВА СИЛ, С КОТОРЫМИ ТЕЛА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ДРУГ С ДРУГОМ

Физическая природа сил

Эти силы обусловлены *одним и тем же взаимодействием* и поэтому они имеют *одну и ту же физическую природу*.

Примеры

1. На тело, находящееся вблизи Земли, действует сила тяжести со стороны Земли, а тело, в свою очередь, притягивает Землю (рис. 10.2). Обе силы являются проявлениями сил всемирного тяготения.



Рис. 10.2. Силы притяжения между Землей и телом на ее поверхности

Эти силы связаны друг с другом третьим законом Ньютона. (Масштаб на рисунке не соблюден.)

2. На столе лежит книга. Книга давит на стол, а стол — на книгу (рис. 10.3). Обе эти силы являются силами упругости. Силу, с которой книга давит на стол, называют *весом* книги, а силу, с которой стол давит на книгу, называют *силой нормальной реакции*¹.

¹ Название этой силы обусловлено тем, что сила нормальной реакции направлена перпендикулярно поверхности опоры, а перпендикуляр называют иногда «нормалью».

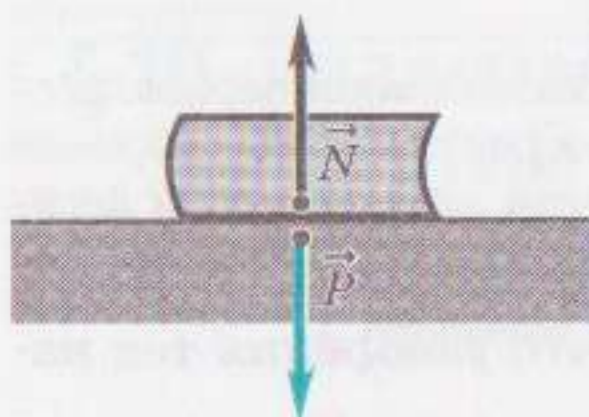


Рис. 10.3. Вес \vec{P} и сила нормальной реакции \vec{N} . Эти силы связаны друг с другом третьим законом Ньютона.

Могут ли эти силы компенсировать друг друга?

Силы, с которыми тела взаимодействуют друг с другом, приложены к *разным* телам: сила \vec{F}_1 приложена к *первому* телу, а сила \vec{F}_2 — ко *второму* телу. Поэтому эти силы *не могут компенсировать друг друга*.

Заметим также, что силы взаимодействия двух тел направлены вдоль прямой, на которой находятся точки приложения этих сил.

Когда силы могут компенсировать друг друга?

Компенсировать друг друга могут только силы, приложенные со стороны различных тел *к одному и тому же* телу.

Вернемся к примеру с лежащей на столе книгой. На книгу действуют две силы: сила тяжести \vec{F}_T , приложенная со стороны Земли, и сила нормальной реакции \vec{N} , приложенная со стороны стола. Эти силы компенсируют друг друга, так как ускорение книги равно нулю (рис. 10.4).

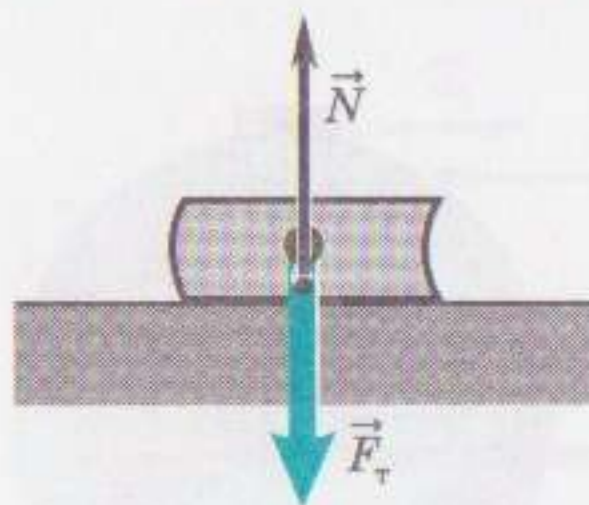


Рис. 10.4. Силы, действующие на покоящуюся книгу

Сила тяжести \vec{F}_T и сила нормальной реакции \vec{N} компенсируют друг друга, так как они приложены к *одному и тому же* телу, ускорение которого равно нулю.

2. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

То, что любое воздействие одного тела на другое всегда является проявлением *взаимодействия* между телами, не всегда очевидно.

Дело в том, что приобретаемые взаимодействующими телами ускорения зависят не только от сил, но и от *масс* этих тел. Поэтому, хотя *силы* взаимодействия тел и равны по модулю, *ускорения* тел будут сильно отличаться, если сильно отличаются массы тел.

Например, ускорение, приобретаемое одним из тел, может вообще остаться незамеченным.

Примеры

Взаимодействие камня и Земли

Когда камень падает вниз, его ускорение, сообщаемое камню силой притяжения Земли (ускорение свободного падения), довольно велико: скорость камня каждую секунду увеличивается примерно на 10 м/с.

Но камень притягивает Землю точно с такой же по модулю силой, с какой Земля притягивает камень. Однако ускорение Земли, обусловленное притяжением камня, настолько мало, что его невозможно измерить даже самыми точными приборами, так как масса Земли в огромное число раз больше массы камня.

Взаимодействие Луны и Земли

Если бы притягивающий Землю «камень» имел массу, сравнимую с массой Земли — например, как Луна, — то ускорение Земли стало бы заметным. Ускорение Земли, обусловленное притяжением ее к Луне, действительно удалось измерить — именно так и была определена масса Луны (рис. 10.5).

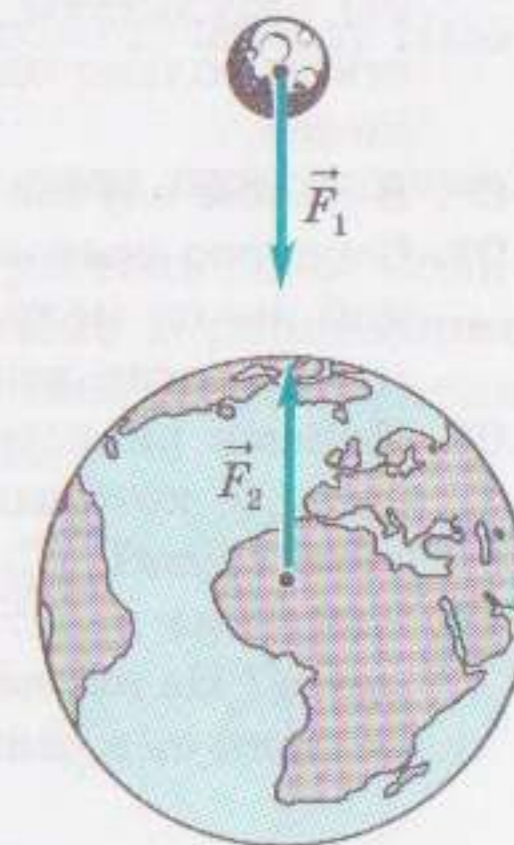


Рис. 10.5. Силы взаимодействия Земли и Луны

Ускорение, которое сообщает Луна Земле вследствие того, что она притягивает Землю, удалось измерить. (Масштаб на рисунке не соблюден.)

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При *взаимодействии* двух тел на *каждое* из них действует сила со стороны другого тела.
- *Третий закон Ньютона*: тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Эти силы имеют одну и ту же физическую природу и не могут компенсировать друг друга, поскольку приложены к разным телам.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. При взаимодействии двух тел первое тело приобретает ускорение в 2 раза большее, чем второе. Масса какого тела больше и во сколько раз?
2. Миша и Петя имеют равные массы. Они стоят на очень скользком льду, и Миша тянет Петю за руку. Какой из мальчиков движется с большим ускорением? Считайте, что трением можно пренебречь.
3. Сформулируйте третий закон Ньютона.
4. Каковы свойства сил, с которыми тела взаимодействуют друг с другом? Проиллюстрируйте ваш ответ примерами.
5. Приведите примеры применения третьего закона Ньютона.
6. Согласно третьему закону Ньютона падающий камень и Земля притягивают друг друга с одинаковыми по модулю силами. Почему же обусловленное этим притяжением ускорение камня заметно, а ускорение Земли — нет?
- 7*. Приведите примеры взаимодействий двух тел, когда: а) заметны результаты действия обеих сил; б) заметен результат действия только одной силы. Объясните, чем обусловлено это различие.
- 8*. В каком случае две силы компенсируют друг друга?
- 9*. Согласно третьему закону Ньютона лошадь тянет повозку с такой же по модулю силой, с какой повозка тянет лошадь. Почему же тогда лошадь с повозкой движутся вперед?
- 10*. Почему равные по модулю и противоположно направленные силы, с которыми взаимодействуют два тела, не компенсируют друг друга?
- 11*. Какие из действующих на вас сейчас сил компенсируют друг друга? На какие тела действуете вы? Укажите, какие из рассмотренных сил связаны третьим законом Ньютона.

§ 11. ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

1. На пути к открытию
2. Закон всемирного тяготения

Гравитационное¹ взаимодействие, то есть взаимодействие, обусловленное силами тяготения, «управляет» движением планет, звезд и целых галактик.

В этом параграфе мы расскажем о том, как был открыт закон всемирного тяготения, и рассмотрим основные свойства гравитационного взаимодействия.

1. НА ПУТИ К ОТКРЫТИЮ

КАК ДВИГАЛИСЬ БЫ ПЛАНЕТЫ, ЕСЛИ БЫ ИХ НЕ ПРИТЯГИВАЛО СОЛНЦЕ?

Планеты движутся вокруг Солнца примерно с постоянной по модулю скоростью по орбитам, близким к круговым². Отсюда следует, что они движутся с ускорением, направленным к Солнцу (см. § 4. *Криволинейное движение*). Согласно второму закону Ньютона это значит, что

на планеты со стороны Солнца действует сила притяжения.

Если бы это притяжение исчезло, планеты улетели бы от Солнца, двигаясь по инерции, то есть прямолинейно и равномерно (рис. 11.1). Да и Луна не могла бы быть спутником Земли, если бы между Землей и Луной не было притяжения.

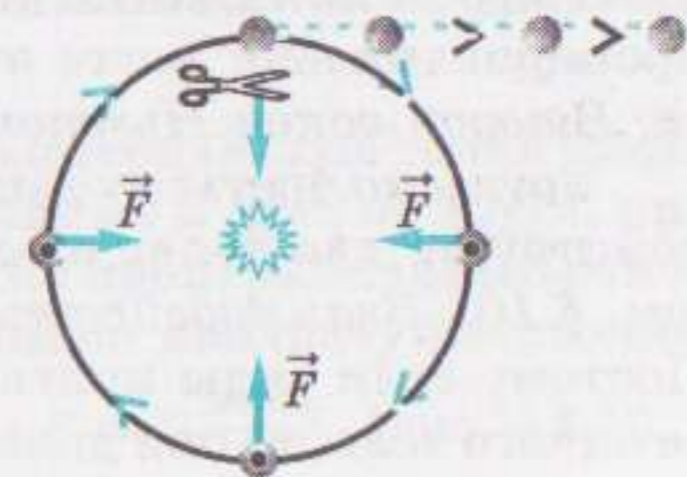


Рис. 11.1. Движение планеты под действием силы притяжения Солнца

Если бы притяжение Солнца исчезло, планета улетела бы от Солнца, двигаясь по инерции.

ОТ ЯБЛОК ДО ПЛАНЕТ

Идея сопоставить притяжение планет к Солнцу и притяжение тел к Земле родилась у Ньютона, когда ему было 23 года, в 1666 году. По его собственным воспоминаниям, на эту мысль его навело падающее яблоко.

¹ Слово «гравитация» происходит от латинского слова «гравитас» — тяжесть.

² Если быть более точным, траектории планет являются эллипсами.

Яблоко падает потому, что его притягивает Земля, подумал молодой Ньютон. И Луна движется вокруг Земли потому, что ее тоже притягивает Земля (рис. 11.2). Так может, то самое притяжение Земли, которое действует на яблоко, простирается до Луны? Может, и притяжение планет к Солнцу имеет ту же физическую природу, что притяжение тел к Земле?

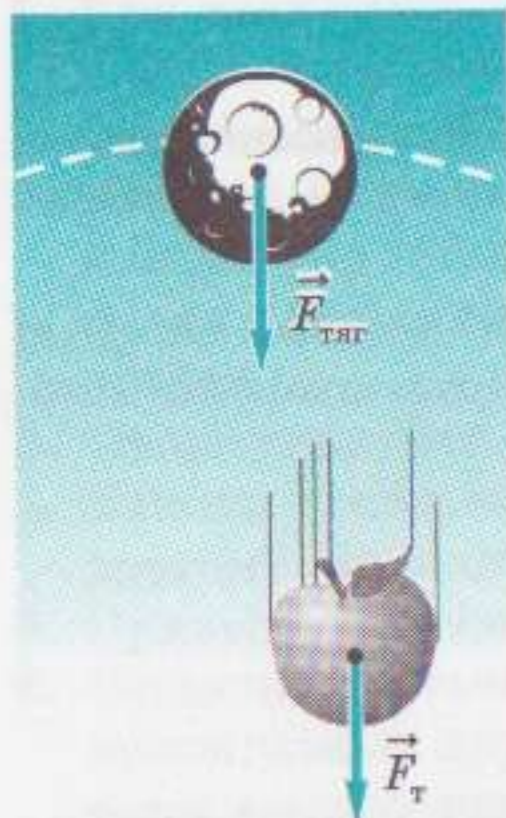


Рис. 11.2. Проявления закона всемирного тяготения

Окинув мысленным взором «земное» и «небесное», Ньютон предположил, что существует единый закон всемирного тяготения, которому подвластны все тела во Вселенной — от яблок до планет.

Чтобы проверить это предположение, Ньютону надо было определить, от чего и как зависит сила тяготения.

В поисках разгадки явления тяготения Ньютон и сформулировал основные законы механики, которые мы называем сегодня тремя законами Ньютона.

КАК ЗАВИСЯТ СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ ТЕЛ ОТ ИХ МАСС?

Из того, что все тела падают с одинаковым ускорением, следует, что сила тяжести, действующая на тело со стороны Земли, пропорциональна массе этого тела (см. § 9. Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона).

Согласно третьему закону Ньютона силы, с которыми взаимодействуют два тела, имеют одинаковую физическую природу (см. § 10. Взаимодействие двух тел. Третий закон Ньютона). Поэтому если силы притяжения двух тел пропорциональны массе одного тела, то они должны быть пропорциональны и массе другого тела. Это значит, что

силы притяжения двух тел пропорциональны произведению их масс.

КАК ЗАВИСЯТ СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ ТЕЛ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ НИМИ?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо было бы поставить опыт, в котором можно изменять расстояние между телами и измерять, как при этом изменяется сила притяжения.

К счастью, такой величественный «эксперимент» поставила сама природа, «запустив» различные планеты Солнечной системы на орбиты разных радиусов.

Еще в 16-м веке (до изобретения телескопа!) датский астроном Тихо Браге выполнил очень точные астрономические наблюдения движения планет. Анализируя результаты этих наблюдений, ученик Браге, немецкий астроном Иоганн Кеплер в начале 17-го века обнаружил, что в движении планет существуют интересные общие закономерности.

Например, оказалось, что отношение $\frac{R^3}{T^2}$, где R — радиус орбиты планеты, а T — период ее обращения вокруг Солнца, для всех планет Солнечной системы одно и то же. Эту закономерность назвали третьим законом Кеплера.

Именно третий закон Кеплера и оказался для Ньютона ключом к открытию: используя этот закон, Ньютон доказал, что

силы притяжения между двумя материальными точками убывают обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.

(Связь между законом всемирного тяготения и третьим законом Кеплера будет рассмотрена в § 15. Примеры решения задач по динамике).

2. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Определив, как зависят силы притяжения двух материальных точек от их масс и расстояния между ними, Ньютон сформулировал

закон всемирного тяготения: две материальные точки 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 ними. Модуль каждой силы $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ (рис. 11.3).

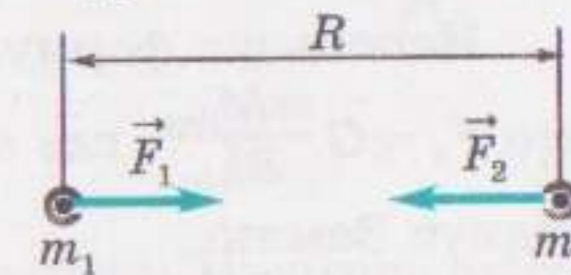


Рис. 11.3. Притяжение двух материальных точек

Коэффициент пропорциональности G называется гравитационной постоянной.

Измерения (см. ниже раздел «Как была измерена гравитационная постоянная?») показали, что $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.

Физический смысл гравитационной постоянной

Гравитационная постоянная численно равна силе, с которой материальная точка массой 1 кг притягивает другую материальную точку с такой же массой, если они находятся на расстоянии 1 м друг от друга: эта сила равна $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н. Такую силу можно измерить только с помощью очень чувствительных приборов. Вот почему в повседневной жизни мы замечаем только притяжение тел к Земле, имеющей огромную массу.

СИЛА ТЯЖЕСТИ

Ньютон доказал, что формула закона всемирного тяготения для материальных точек справедлива также для *однородных сфер и шаров*, даже если расстояние между центрами сфер или шаров сравнимо с их радиусами — в таком случае расстоянием R следует считать расстояние между центрами шаров.

Он доказал также, что эта формула справедлива, когда одно тело — однородный шар, а другое тело (любой формы) намного меньше первого. Поэтому эта формула применима для нахождения *силы тяжести \vec{F}_T* , то есть силы притяжения к Земле тела, находящегося вблизи ее поверхности (см. § 9. *Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона*). В этом случае расстояние R в формуле для силы тяготения равно радиусу Земли (рис. 11.4).

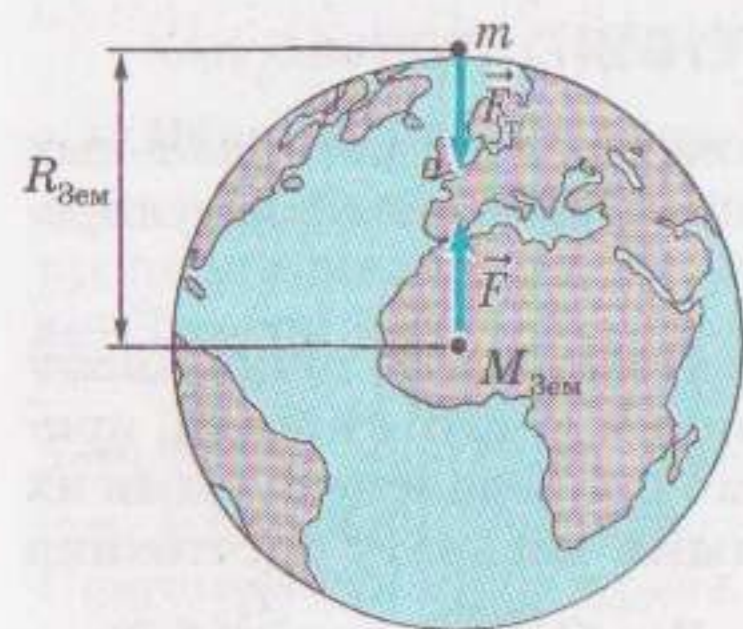


Рис. 11.4. Сила тяжести \vec{F}_T , действующая на тело со стороны Земли, и сила тяготения \vec{F} , действующая на Землю со стороны тела

Эти силы являются проявлениями сил всемирного тяготения.

Используя формулу закона всемирного тяготения, получаем, что $F_T = G \frac{mM_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}}^2}$, где m — масса тела, $M_{\text{зем}}$ — масса Земли, $R_{\text{зем}}$ — радиус Земли.

Ускорение свободного падения, гравитационная постоянная и масса Земли

Напомним, что сила тяжести выражается также через ускорение свободного падения \vec{g} с помощью формулы $\vec{F}_T = m\vec{g}$.

Сравнивая два выражения для силы тяжести $\vec{F}_T = G \frac{mM_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}}^2}$ и $F_T = mg$, получаем соотношение между ускорением свободного падения, гравитационной постоянной, радиусом и массой Земли:

$$g = G \frac{M_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}}^2}.$$

Значения ускорения свободного падения и радиуса Земли известны. Следовательно, *если бы была известна гравитационная постоянная*, то, используя это соотношение, можно было бы определить массу Земли.

Поэтому описанный ниже тонкий опыт по измерению гравитационной постоянной образно назвали «взвешиванием Земли».

КАК БЫЛА ИЗМЕРЕНА ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ

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

В «планетарном» масштабе поставить такой опыт невозможно, но в конце 18-го века его смог поставить в лаборатории английский ученый Генри Кавендиш. Ему удалось измерить чрезвычайно малые силы притяжения между металлическими шарами.

Кавендиш подвесил на тонкой нити горизонтальный стержень с небольшими металлическими шарами a и b и по углу поворота нити измерил силы притяжения, действующие на эти шары со стороны больших металлических шаров A и B (рис. 11.5).

Малые углы поворота нити удалось измерить по движению «зайчика» от прикрепленного к нити зеркальца.

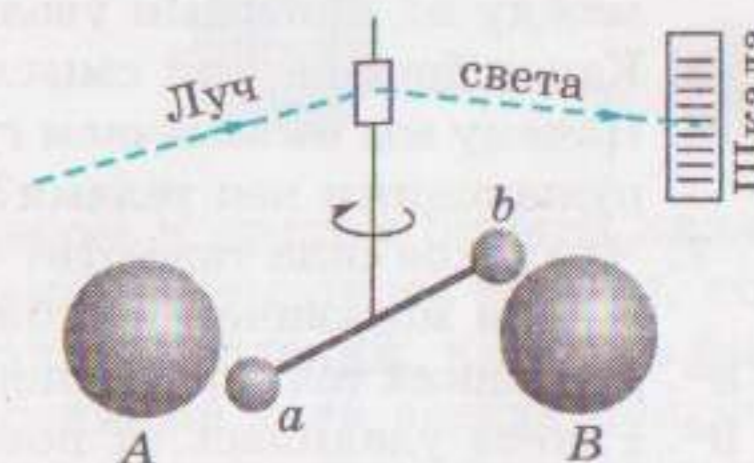


Рис. 11.5. Схема опыта Кавендиша по измерению гравитационной постоянной

Этот опыт назвали «взвешиванием Земли».

НОВАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ — ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Мы уже знаем, что согласно второму закону Ньютона масса тела является мерой его *инертности*. Теперь мы увидели, что масса играет еще одну роль: согласно закону всемирного тяготения масса тела является мерой его *гравитационного взаимодействия*.

В начале 20-го века эта «двойная» роль массы была положена Эйнштейном в основу новой теории тяготения, которая получила

название *общей теории относительности*. Согласно этой теории масса тела изменяет свойства пространства и времени, проявлением чего являются и инертность тела, и притяжение им других тел.

Выводы общей теории относительности получили подтверждение в астрономических наблюдениях.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Закон всемирного тяготения:** две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягивают друг друга с силами, прямо пропорциональными массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Модуль каждой силы $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$.
- **Гравитационная постоянная** $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как двигались бы планеты, если бы их не притягивало Солнце?
2. С одинаковой ли силой притягивает Земля лежащий камень и падающий? Если да, то почему первый камень покоится, а второй движется с ускорением?
3. Как формулируют закон всемирного тяготения? Кто его открыл?
4. Как изменится сила притяжения двух шаров, если расстояние между их центрами увеличить в 10 раз?
5. Каков физический смысл гравитационной постоянной?
6. Почему мы не замечаем гравитационного притяжения между окружающими нас телами?
7. Что такое сила тяжести? Одинаково ли направление силы тяжести для москвичей и сибиряков?
- 8*. Для каких тел справедлива формула закона всемирного тяготения?
- 9*. Ракета удалилась от поверхности Земли на расстояние, равное радиусу Земли. Во сколько раз уменьшилась при этом действующая на ракету сила тяжести?
- 10*. Как связано значение ускорения свободного падения со значением гравитационной постоянной?
- 11*. Оцените, во сколько раз ускорение свободного падения на поверхности Луны меньше, чем на поверхности Земли. Для оценки примите, что масса Луны в 80 раз меньше массы Земли, а радиус Луны в 4 раза меньше радиуса Земли.
- 12*. Кто и как впервые измерил гравитационную постоянную?

§ 12. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

1. Движение тел вблизи поверхности Земли
2. Движение искусственных спутников Земли и космических кораблей

В этом параграфе мы выясним, как движутся тела под действием силы притяжения к Земле.

Мы рассмотрим сначала движение тел вблизи поверхности Земли, а затем — движение искусственных спутников Земли и космических кораблей.

1. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Поставим опыт

Падение стального шара и бумажного листа

Отпустим одновременно стальной шар и лист бумаги — мы увидим, что шар «камен» падает вниз, а лист бумаги опускается плавно (рис. 12.1).

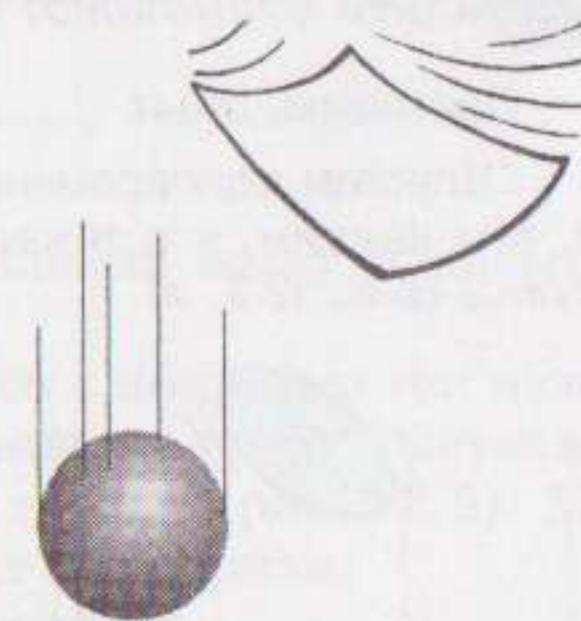


Рис. 12.1. Падение стального шара и бумажного листа

Стальной шар падает намного быстрее, чем бумажный лист.

Очевидным различием между шаром и листом бумаги является то, что масса шара намного больше массы листа бумаги, поэтому из этого и сходных с ним других наблюдений, казалось бы, можно сделать вывод, что более массивные тела всегда падают быстрее, чем менее массивные, а тела равной массы падают одинаково. И действительно, еще в античные времена Аристотель «узаконил» такое представление о падении тел.

Падение бумажного листа и бумажного комка

Перейдем теперь от наблюдений к *опытам*. Как мы уже знаем, опыт отличается от наблюдения тем, что создаются специальные условия протекания явления, благодаря чему можно получить

ответ у природы на «четко поставленный вопрос». Для начала проверим, действительно ли тела *равной массы* всегда падают *одинаково*?

Поставим опыт

Отпустим с одной и той же высоты лист бумаги и сделанный из такого же листа бумажный комочек. Лист падает намного медленнее комка, хотя их массы одинаковы (рис. 12.2). Значит, тела одинаковой массы могут падать по-разному!

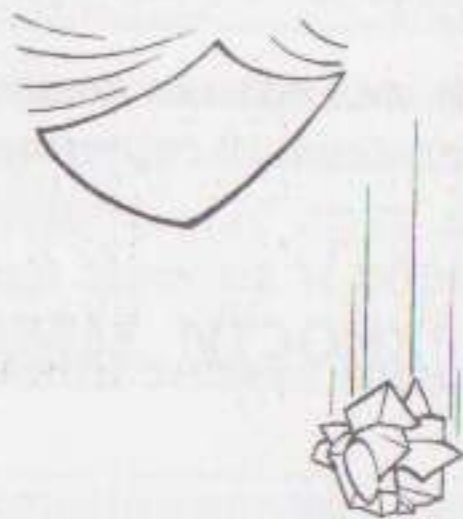


Рис. 12.2. Падение листа бумаги и бумажного комка

Лист падает значительно медленнее, чем комочек, хотя их массы одинаковы.

Падение монеты и бумажного кружка

Выясним теперь: могут ли предметы, имеющие *разные массы*, падать *одинаково*? Снова зададим этот вопрос природе.

Поставим опыт

Отпустим одновременно монету и бумажный кружок такого же размера. Мы увидим, что тяжелая монета падает значительно быстрее легкого кружка (рис. 12.3, а).

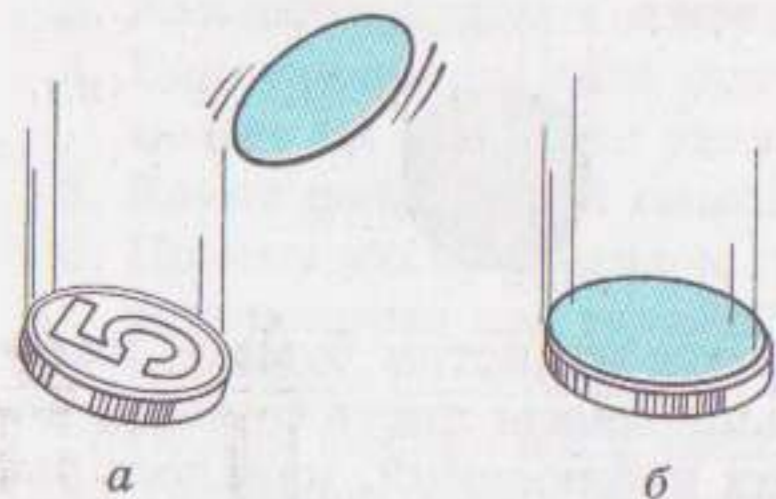


Рис. 12.3. Падение монеты и бумажного кружка: а — если они падают порознь, то монета падает намного быстрее, чем кружок; б — если положить кружок на монету, они падают вместе

А теперь повторим этот опыт, положив бумажный кружок на монету. Мы увидим, что на этот раз они падают вместе, то есть кружок и монета падают *одинаково* (рис. 12.3, б)!

Описанные опыты наводят на мысль, что различие в падении тел обусловлено различной ролью *сопротивления воздуха*. Например, сила тяжести для листа бумаги такая же, как для бумажного комка, но сопротивление воздуха для листа значительно больше, чем для комка. В случае же падения монеты и кружка сила

сопротивления воздуха почти одинакова, но сила тяжести для монеты значительно больше, чем для кружка. А когда кружок падал непосредственно за монетой, он практически не испытывал сопротивления воздуха — вот почему он падал вместе с монетой.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Опыт Галилея

На основании опытов, подобных описанным, Галилей предположил, что в *идеальной* ситуации — если бы сопротивления воздуха не было совсем — все тела падали бы *одинаково*.

Чтобы проверить свое предположение, Галилей поставил опыт: с Пизанской башни бросили одновременно пулю и пушечное ядро. Хотя их массы отличаются во много раз, пуля и ядро упали практически *одновременно*, подтвердив предположение Галилея (рис. 12.4)!

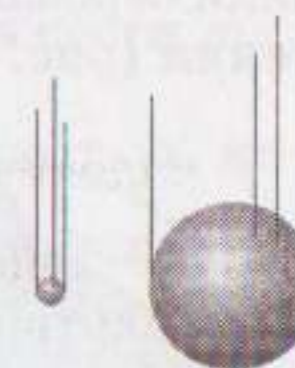


Рис. 12.4. Падение пули и ядра

Массы этих тел отличаются во много раз, но при падении каждого из них сила сопротивления воздуха значительно меньше силы тяжести.

Демонстрация свободного падения

Падение тел при отсутствии сопротивления воздуха называют *свободным падением*.

Свободное падение часто демонстрируют с помощью так называемой трубки Ньютона. Положим в стеклянную трубку металлический шарик и перышко и перевернем трубку (рис. 12.5). Мы увидим, что перышко при падении отстает от шарика.

Но если откачать из трубки воздух, шарик и перышко будут падать одинаково. Значит, различие в их падении было обусловлено тем, что для перышка роль сопротивления воздуха больше.

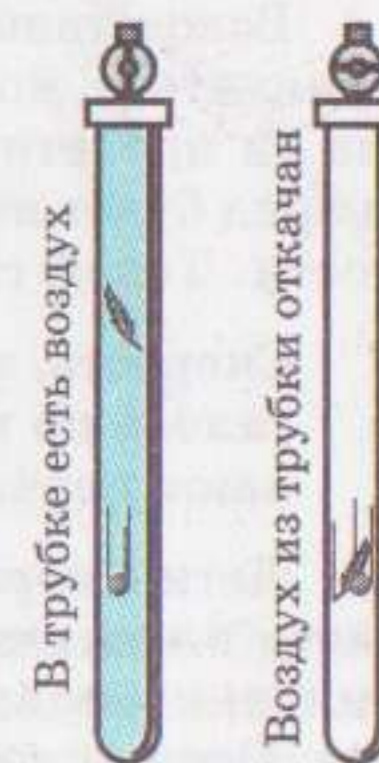


Рис. 12.5. Падение тел в трубке Ньютона

Если в трубке есть воздух, перышко отстает от металлического шарика, а если воздух откачан, они падают одинаково.

Движение тел, брошенных с начальной скоростью

Такое движение в случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь, мы рассматривали ранее (см. § 4. *Криволинейное движение* и в § 9. *Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона*).

Мы выяснили, что траектория движения тела зависит от направления его начальной скорости: если тело брошено вниз или вверх, оно движется прямолинейно, а если горизонтально или под углом к горизонту — по параболе.

2. ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ И КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

В одной из своих книг Ньютон описывает такой мысленный эксперимент. Представим себе, что на очень высокой горе установили огромную пушку и стреляют из нее в горизонтальном направлении (рис. 12.6).



Рис. 12.6. Схема запуска искусственного спутника Земли, предложенная Ньютоном

Вследствие притяжения к Земле траектория снаряда будет искривляться, но чем больше начальная скорость снаряда, тем дальше он пролетит. И при некоторой достаточно большой скорости снаряд будет лететь вдоль поверхности Земли, двигаясь по окружности. Такой снаряд станет *искусственным спутником Земли*.

Скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно двигалось по круговой орбите вблизи поверхности Земли, называют первой космической скоростью.

Летя с первой космической скоростью, снаряд все время «падает» в том смысле, что движется с ускорением свободного падения, так как во время полета на него действует только сила тяжести. Однако из-за большой скорости снаряд постоянно «промахивается».

ается», причем в точности так, что остается все время на одном и том же расстоянии от Земли.

В наши дни эксперимент, который Ньютону представлялся только как мысленный, стал повседневной реальностью. В 1957 году в Советском Союзе был запущен первый искусственный спутник Земли, а сегодня в космосе постоянно «обитают» сотни искусственных спутников, а также космические станции.

Чему равно значение первой космической скорости?

Будем считать, что спутник движется по круговой орбите на небольшой высоте над поверхностью Земли, то есть радиус его орбиты равен радиусу Земли $R_{\text{зем}}$.

Мы уже знаем, что если тело равномерно движется по окружности радиусом R со скоростью v , то оно движется с центростремительным ускорением $\frac{v^2}{R}$ (см. § 4. *Криволинейное движение*).

В данном случае ускорение спутнику сообщает сила тяжести $m\vec{g}$, то есть ускорение спутника по модулю равно g .

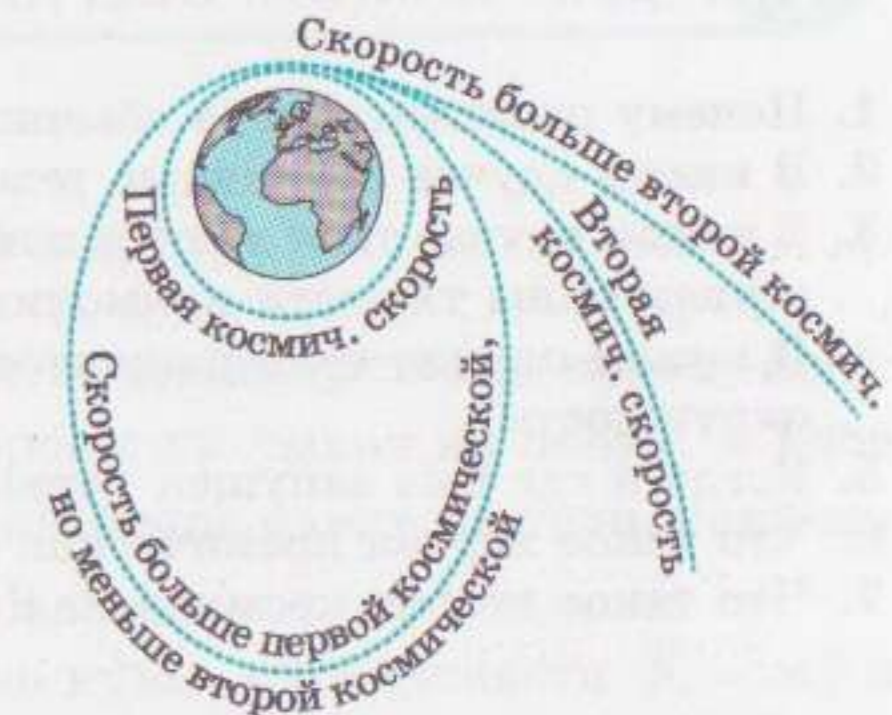
Значит, при движении с первой космической скоростью, которую обозначают v_1 , выполняется равенство $\frac{v_1^2}{R_{\text{зем}}} = g$. Отсюда следует, что первая космическая скорость $v_1 = \sqrt{R_{\text{зем}}g} \approx 7,9$ км/с.

ВТОРАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

Если сообщить телу скорость, несколько большую первой космической, оно будет двигаться не по окружности, а по эллипсу (рис. 12.7).

Рис. 12.7. Вид траектории космического аппарата в зависимости от его начальной скорости

При скорости, равной или большей второй космической скорости, космический аппарат навсегда покинет окрестности Земли.



При увеличении начальной скорости размеры эллипса будут увеличиваться, а при некоторой скорости тело навсегда покинет окрестности Земли. Эту скорость называют *второй космической*.

скоростью. Расчеты показывают, что вторая космическая скорость равна 11,2 км/с.

Однако, даже улетев от Земли, тело останется в пределах Солнечной системы, став искусственным спутником Солнца. Именно такова судьба космических кораблей, отправленных для исследования других планет Солнечной системы — например, Марса и Венеры.

В заключение заметим, что для того, чтобы запустить космический корабль на околоземную орбиту или к другой планете Солнечной системы, ему в действительности надо сообщить скорость, несколько бóльшую одной из рассчитанных выше, поскольку необходимо учесть сопротивление воздуха при выводе спутника за пределы земной атмосферы.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При движении тел под действием силы тяжести вблизи поверхности Земли большую роль играет часто сопротивление воздуха. Если можно пренебречь сопротивлением воздуха, все тела падают с *ускорением свободного падения*. Такое движение тел называется *свободным падением*.
- *Первой космической скоростью* называют скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно двигалось по круговой орбите вблизи поверхности Земли. Первая космическая скорость равна 7,9 км/с.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему различные тела обычно падают по-разному?
2. В каком случае различные тела падают одинаково?
3. В каком случае тело вблизи поверхности Земли движется под действием силы тяжести прямолинейно? по параболе?
4. В каком случае тело движется под действием силы тяжести по окружности?
5. Когда и где был запущен первый искусственный спутник Земли?
6. Что такое первая космическая скорость? Чему она равна?
7. Что такое вторая космическая скорость? Чему она равна?

§ 13. ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

1. Вес
2. Невесомость

В этом параграфе мы покажем, что вес тела зависит от ускорения, с которым движется это тело. Мы расскажем, чем вес отличается от силы тяжести.

Рассмотрим также состояние невесомости тела, то есть состояние, при котором вес тела равен нулю.

1. ВЕС

Когда вы стоите на снегу или на песке, вы оставляете след. Это свидетельствует о том, что вы давите на опору с некоторой силой. Если вы перейдете на асфальт, вы будете давить на опору с прежней силой, хотя на асфальте следов не видно.

Эта сила — ваш вес.

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

Вес обозначают обычно \vec{P} .

Покажем, что вес одного и того же тела может быть *различным*, так как вес тела зависит от ускорения, с которым движется это тело. Начнем с простейшего случая, когда ускорение тела равно нулю, то есть оно покоится или движется с постоянной скоростью.

ВЕС ПОКОЯЩЕГОСЯ ТЕЛА

Докажем, что

для покоящегося тела вес $\vec{P} = m\vec{g}$.

Если тело лежит на опоре, то согласно третьему закону Ньютона вес \vec{P} , то есть сила, с которой тело давит на опору, и сила нормальной реакции \vec{N} , с которой опора давит на тело, связаны соотношением $\vec{P} = -\vec{N}$ (рис. 13.1).

Так как ускорение тела равно нулю, сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и сила нормальной реакции \vec{N} компенсируют друг друга: $m\vec{g} + \vec{N} = 0$. Отсюда $\vec{N} = -m\vec{g}$.

Из формул $\vec{P} = -\vec{N}$ и $\vec{N} = -m\vec{g}$ получаем, что $\vec{P} = m\vec{g}$.

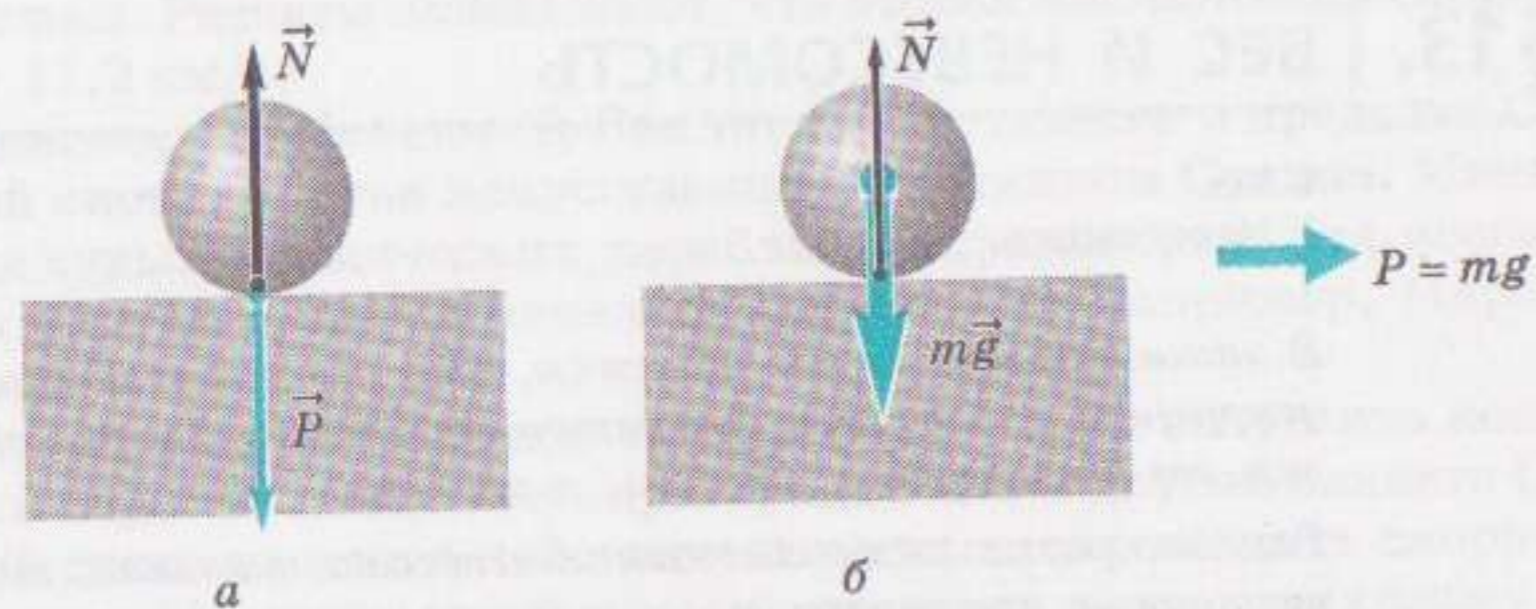
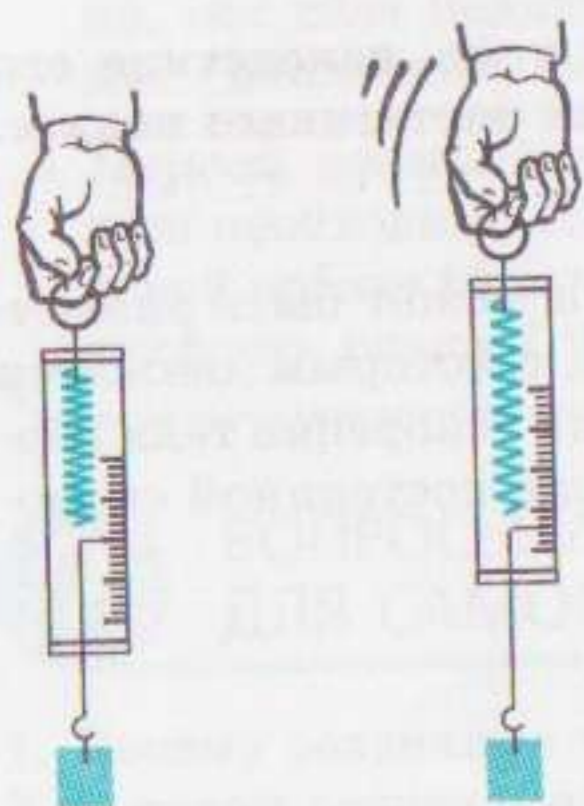


Рис. 13.1. К выводу формулы для веса покоящегося тела:
a — силы взаимодействия между телом и опорой;
б — силы, действующие на тело, покоящееся на опоре

Вес тела равен $m\vec{g}$ и тогда, когда тело движется равномерно и прямолинейно (в любом направлении), так как при этом ускорение тела также равно нулю.

ВЕС ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ С УСКОРЕНИЕМ¹



Если поднимать груз с ускорением, то показание динамометра увеличится (рис. 13.2).

Рис. 13.2. Зависимость веса тела от ускорения

Но показание динамометра — это как раз и есть *вес* тела, то есть сила, с которой тело растягивает подвес. Значит, вес тела, движущегося с ускорением, не равен весу покоящегося тела. Докажем, что

для тела, движущегося с ускорением \vec{a} , вес $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$.

Как и в случае покоящегося тела, согласно третьему закону Ньютона $\vec{P} = -\vec{N}$, где \vec{N} — сила нормальной реакции.

¹ Мы будем рассматривать только случай, когда ускорение \vec{a} направлено вертикально (вверх и вниз).

Ускорение телу сообщает равнодействующая силы тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и силы нормальной реакции \vec{N} . Согласно второму закону Ньютона $\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}$, откуда $\vec{N} = m\vec{a} - m\vec{g}$. Из формул $\vec{P} = -\vec{N}$ и $\vec{N} = m\vec{a} - m\vec{g}$ следует, что $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$.

Обратите внимание: вес тела зависит только от его *ускорения*; скорость же тела значения не имеет.

Рассмотрим теперь по отдельности случаи, когда ускорение тела направлено вверх и вниз.

Вес тела, движущегося с ускорением, направленным вверх

Направим ось x вертикально вниз. Тогда $g_x = g$, $a_x = -a$ и поэтому векторное уравнение $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ в проекциях на ось x принимает вид $P = m(g + a)$. Итак,

если ускорение тела направлено вверх, вес тела больше силы тяжести: $P > mg$ (рис. 13.3).

Мы ощущаем это увеличение веса в кабине разгоняющегося лифта, движущегося вверх, или в кабине тормозящего лифта, движущегося вниз, — в обоих этих случаях ускорение направлено *вверх*.

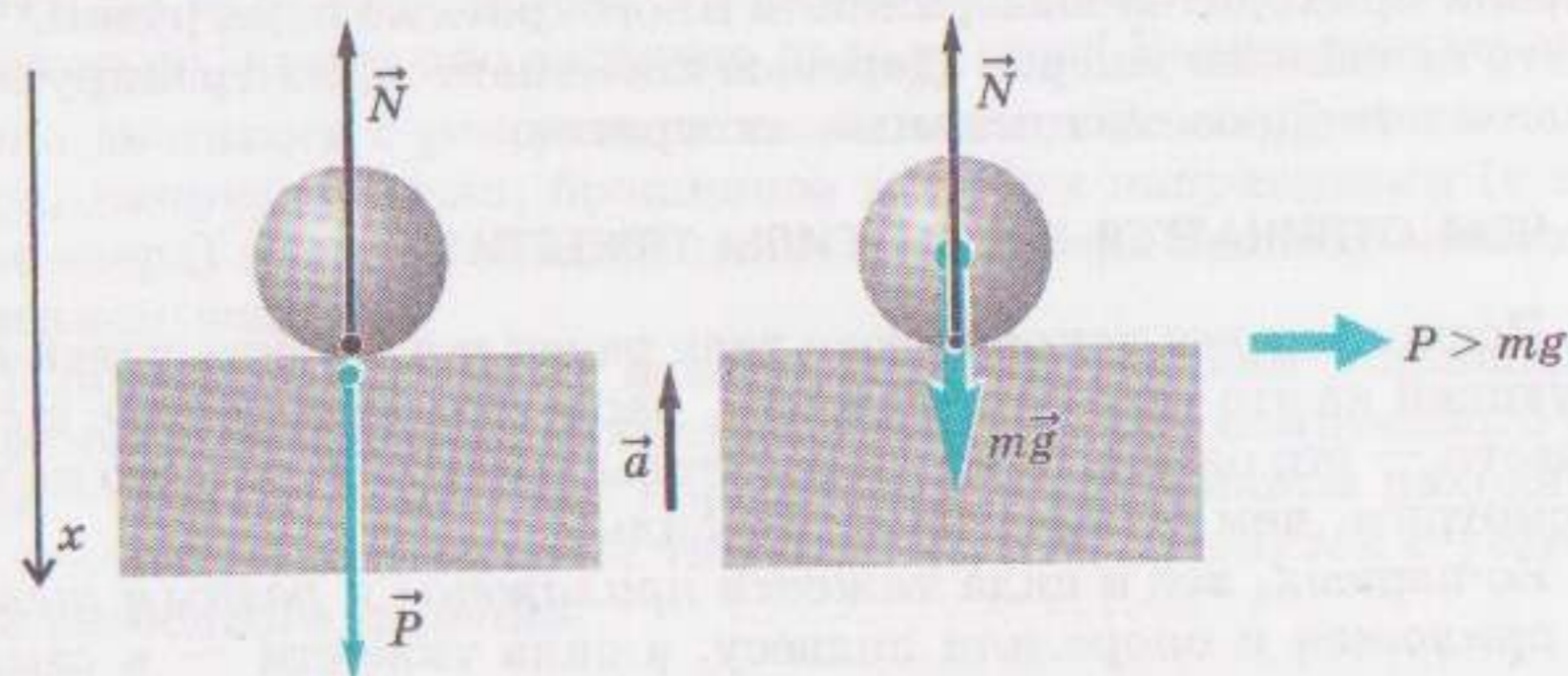


Рис. 13.3. Силы взаимодействия между телом и опорой и силы, действующие на тело, когда оно движется с ускорением, направленным вверх

Вес тела, движущегося с ускорением, направленным вниз

В этом случае $g_x = g$, $a_x = a$, и поэтому векторное уравнение $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ в проекциях на ось x принимает вид $P = m(g - a)$. Итак,

если ускорение тела направлено вниз, вес тела меньше силы тяжести: $P < mg$ (рис. 13.4).

Мы ощущаем это уменьшение веса в кабине разгоняющегося лифта, движущегося вниз, или в кабине тормозящего лифта, движущегося вверх, — в обоих этих случаях ускорение направлено вниз.

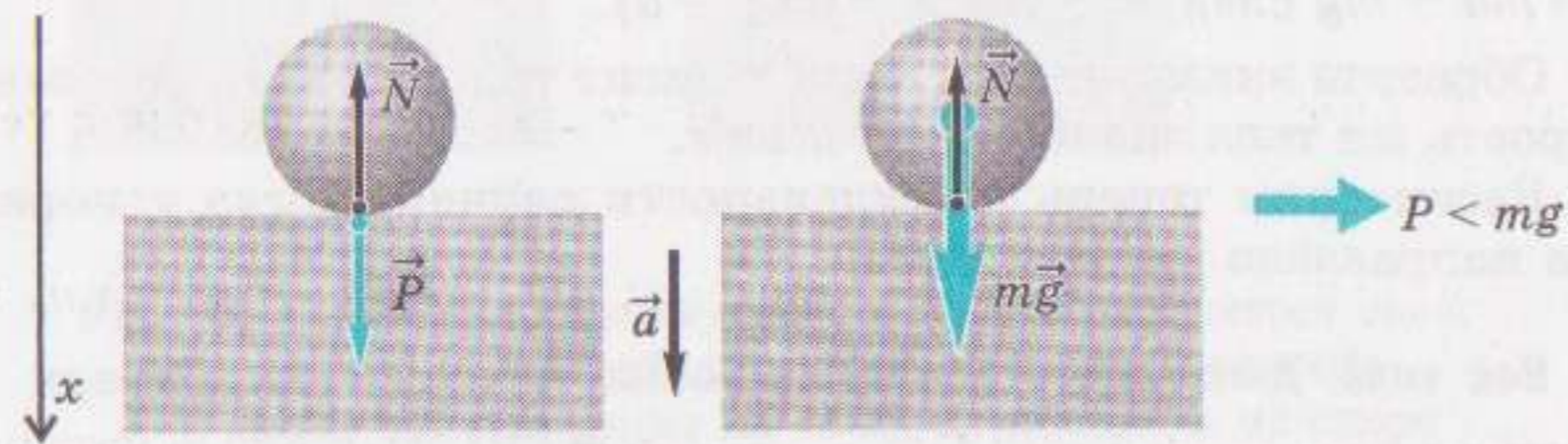


Рис. 13.4. Силы взаимодействия между телом и опорой и силы, действующие на тело, когда оно движется с ускорением, направленным вниз

Перегрузки

Когда вес тела больше силы тяжести, говорят, что тело испытывает *перегрузку*. Здоровый человек может без вреда выдерживать кратковременные трехкратные перегрузки, то есть увеличение веса в три раза. Космонавтам при старте и посадке космического корабля приходится выдерживать многократные перегрузки. Чтобы это не нанесло ущерба здоровью космонавтов, их тренируют на земле с помощью специальных аппаратов.

ЧЕМ ОТЛИЧАЕТСЯ ВЕС ОТ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ?

Поскольку вес покоящегося тела равен $m\vec{g}$, то есть равен действующей на это тело силе тяжести, часто считают, что вес и сила тяжести — это одна и та же сила. Чтобы убедиться, что это не так, рассмотрим, чем *отличаются* эти силы.

Во-первых, вес и сила тяжести *приложены к разным телам*: вес приложен к опоре или подвесу, а сила тяжести — к самому телу.

Во-вторых, вес и сила тяжести имеют *различную физическую природу*: вес обычно является силой упругости¹, а сила тяжести является частным случаем силы всемирного тяготения.

Наконец, вес равен силе тяжести только для *покоящегося* тела (или тела, движущегося с постоянной скоростью). Если же тело движется с ускорением, то, как мы видели, вес тела может быть и больше, и меньше силы тяжести.

¹ Но не всегда: когда вы держите, например, карандаш двумя пальцами в вертикальном положении, вес карандаша является по своей физической природе силой трения.

Более того, вес тела может быть даже равен *нулю*, когда сила тяжести нулю не равна!

Этот случай мы сейчас и рассмотрим.

2. НЕВЕСОМОСТЬ

Из формулы $\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ для веса тела, движущегося с ускорением, следует, что при $\vec{a} = \vec{g}$ вес $\vec{P} = 0$. Значит,

если тело движется с ускорением свободного падения, вес тела равен нулю.

Заметим, что тело движется с ускорением свободного падения, когда на него действует только сила тяжести, то есть когда у него нет опоры или подвеса.

Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют состоянием невесомости.

КАК ДОЛЖНО ДВИГАТЬСЯ ТЕЛО, ЧТОБЫ ОНО НАХОДИЛОСЬ В СОСТОЯНИИ НЕВЕСОМОСТИ?

Чтобы тело находилось в состоянии невесомости, совсем не обязательно, чтобы оно свободно падало вниз! Важно только, чтобы оно двигалось с *ускорением свободного падения* \vec{g} . А так движется, например, тело, брошенное в любом направлении (в том числе вверх) *во время всего полета*, если можно пренебречь сопротивлением воздуха.

Длительное состояние невесомости испытывают космонавты во время полета при выключенных двигателях космического корабля — ведь при этом как корабль, так и космонавты находятся под действием только силы тяжести, то есть движутся с ускорением свободного падения.

Можно ли испытать состояние невесомости, не покидая Землю?

Чтобы испытать *кратковременное* состояние невесомости, не обязательно лететь в космос.

Достаточно просто подпрыгнуть: с того момента, когда ваши ноги оторвутся от пола, и до того момента, когда они коснутся пола вновь, вы будете находиться в состоянии невесомости (в том числе при движении *вверх*). Ведь все это время вы не давите на опору и не растягиваете подвес.

Когда человек бежит, он большую часть времени находится в состоянии невесомости (рис. 13.5).



Рис. 13.5. Бегущий человек в момент, когда его ноги не касаются земли, находится в состоянии невесомости

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Весом тела** называют силу, с которой тело, вследствие его притяжения к Земле, давит на опору или растягивает подвес.
- **Вес \vec{P}** покоящегося тела массой m равен $m\vec{g}$.
- Если ускорение тела направлено вверх, вес тела больше силы тяжести: $P > mg$; если же ускорение тела направлено вниз, вес тела меньше силы тяжести: $P < mg$.
- Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют **состоянием невесомости**. Тело находится в состоянии невесомости, когда оно движется с ускорением свободного падения, то есть когда на него действует только сила тяжести.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое вес тела?
2. При каком условии вес тела равен $m\vec{g}$?
3. В каком случае вес тела больше действующей на тело силы тяжести, а в каком случае — меньше?
4. Что такое состояние невесомости? При каком условии тело находится в состоянии невесомости? Приведите примеры.
- 5*. Чему равен вес мяча, брошенного вертикально вверх, в верхней точке траектории?
- 6*. Как испытать кратковременное состояние невесомости, не улетая в космос?

§ 14. СИЛЫ ТРЕНИЯ

1. Сила трения скольжения
2. Сила трения покоя
3. Сила трения качения
4. Сила сопротивления в жидкостях и газах

В этом параграфе мы рассмотрим причины возникновения и свойства различных видов сил трения.

1. СИЛА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Когда соприкасающиеся тела движутся друг относительно друга, между ними возникают **силы трения скольжения**. Действующая на каждое тело сила трения скольжения направлена вдоль поверхности соприкосновения тел противоположно скорости этого тела относительно другого тела (рис. 14.1).

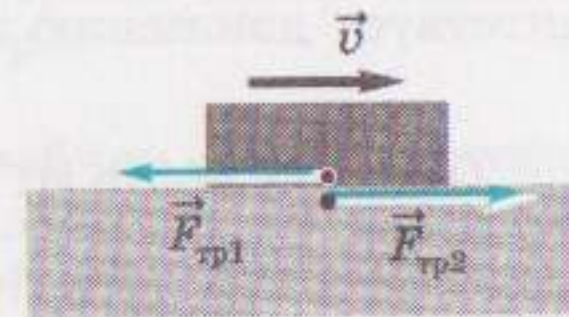


Рис. 14.1. Силы трения, действующие между соприкасающимися телами, движущимися друг относительно друга

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ СИЛА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ?

Опыт показывает, что сила трения скольжения $F_{\text{тр ск}}$ прямо пропорциональна силе нормальной реакции \vec{N} :

$$\text{модуль силы трения скольжения } F_{\text{тр ск}} = \mu N.$$

Коэффициент пропорциональности μ называется **коэффициентом трения**.

Обратите внимание: равенство $F_{\text{тр ск}} = \mu N$ нельзя записывать в векторном виде, поскольку направления силы трения и силы нормальной реакции не совпадают: эти силы направлены **перпендикулярно** друг другу.

Значение коэффициента трения определяют из опыта (см. § 15. *Примеры решения задач по динамике*).

Ниже приведены значения коэффициента трения для некоторых видов поверхностей.

Коэффициенты трения скольжения

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

ИЗ-ЗА ЧЕГО ВОЗНИКАЕТ СИЛА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ?

На поверхностях твердых тел обычно есть небольшие неровности: выступы и впадины, хорошо заметные при рассматривании под лупой или микроскопом. Когда соприкасающиеся тела движутся одно относительно другого, эти неровности зацепляются друг за друга, в результате чего и возникает сила трения скольжения.

Силу трения скольжения можно уменьшить, делая соприкасающиеся поверхности более гладкими.

2. СИЛА ТРЕНИЯ ПОКОЯ

Если мы попытаемся сдвинуть шкаф, прикладывая не слишком большую силу, шкаф останется в покое. Какая же сила в точности компенсирует приложенную нами силу?

Это — *сила трения покоя*. Она возникает при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого и препятствует движению тел друг относительно друга.

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ СИЛА ТРЕНИЯ ПОКОЯ?

Если увеличивать приложенную к шкафу силу, мы все-таки сдвинем шкаф. Значит, сила трения покоя не может превышать некоторую предельную величину, называемую *максимальной силой трения покоя*.

Опыт показывает, что максимальная сила трения покоя не много больше силы трения скольжения, однако во многих задачах для упрощения принимают, что максимальная сила трения покоя равна силе трения скольжения.

ИЗ-ЗА ЧЕГО ВОЗНИКАЕТ СИЛА ТРЕНИЯ ПОКОЯ?

Причины возникновения силы трения покоя сходны с причинами возникновения силы трения скольжения: это главным образом зацепление неровностей шероховатых поверхностей тел.

ВСЕГДА ЛИ СИЛА ТРЕНИЯ ПОКОЯ ПРЕПЯТСТВУЕТ ДВИЖЕНИЮ?

Так как сила трения покоя препятствует *относительному* движению тел, она часто *приводит* тела в движение!

С этим мы встречаемся буквально *на каждом шагу*.

Действительно, делая шаг, человек отталкивается от дорожного полотна¹, толкая его назад. При этом между подошвой и доро-

¹ Далее для краткости мы называем дорожное полотно дорогой.

гой действуют *силы трения покоя*: ведь подошва во время толчка покоится относительно дороги (оставляя порой четкий след). Согласно третьему закону Ньютона со стороны дороги на человека действует сила, направленная *вперед* (рис. 14.2, а).

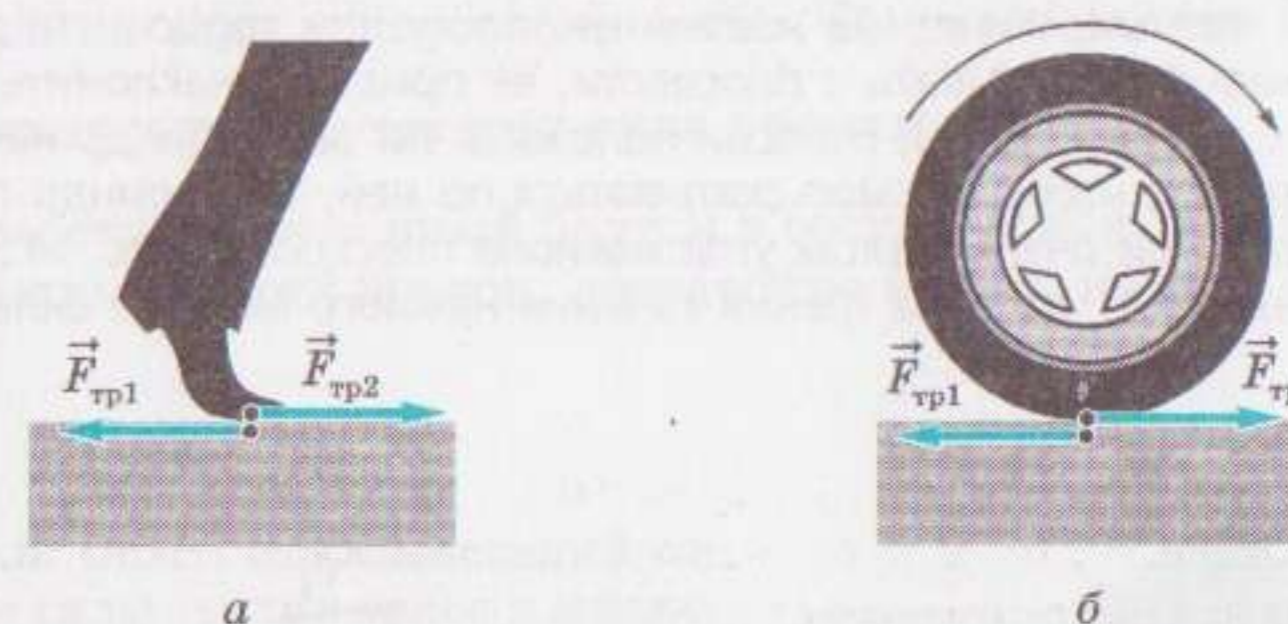


Рис. 14.2. Силы трения, действующие: а — между ногой человека и дорогой; б — между колесом и дорогой. Сила трения покоя «толкает» человека и автомобиль вперед

Сила трения покоя «разгоняет» и автомобиль. Колесо автомобиля, вращаясь, отталкивается от дороги, действуя на нее *силой трения покоя*, — ведь обычно колесо катится без проскальзывания, то есть его нижняя точка покоится относительно дороги. Согласно третьему закону Ньютона дорога при этом толкает колесо (а вместе с ним и автомобиль, соединенный с колесом) вперед (рис. 14.2, б).

Вот почему на скользкой дороге плохо не только тормозить, но и разгоняться.

3. СИЛА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Когда круглое тело (шар, цилиндр, диск) катится по поверхности, на него со стороны поверхности действует *сила трения качения*, направленная противоположно скорости тела. Обычно

сила трения качения намного меньше силы трения скольжения.

Действительно, каждый знает, что катить тележку с грузом намного легче, чем тащить тот же груз волоком. Поэтому в механизмах стараются, по возможности, заменять трение скольжения трением качения — используя, например, подшипники.

При движении стальных колес по стальным рельсам сила трения качения во много раз меньше силы трения скольжения (и соответственно максимальной силы трения покоя). Вот почему один

локомотив, «отталкиваясь» колесами от рельсов с помощью силы трения *покоя*, везет по тем же самым рельсам больше полусотни груженых товарных вагонов: колеса вагонов *катятся*.

Поставим опыт

Если поставить цилиндр на наклонную плоскость торцом, то для того чтобы он начал *соскальзывать* с плоскости, ее придется наклонить на значительный угол (рис. 14.3, а). Но если положить тот же цилиндр на наклонную плоскость так, чтобы он мог *скатываться* по ней, то цилиндр придет в движение даже при очень малом угле наклона плоскости (рис. 14.3, б).

Это доказывает, что сила трения качения намного меньше силы трения скольжения.

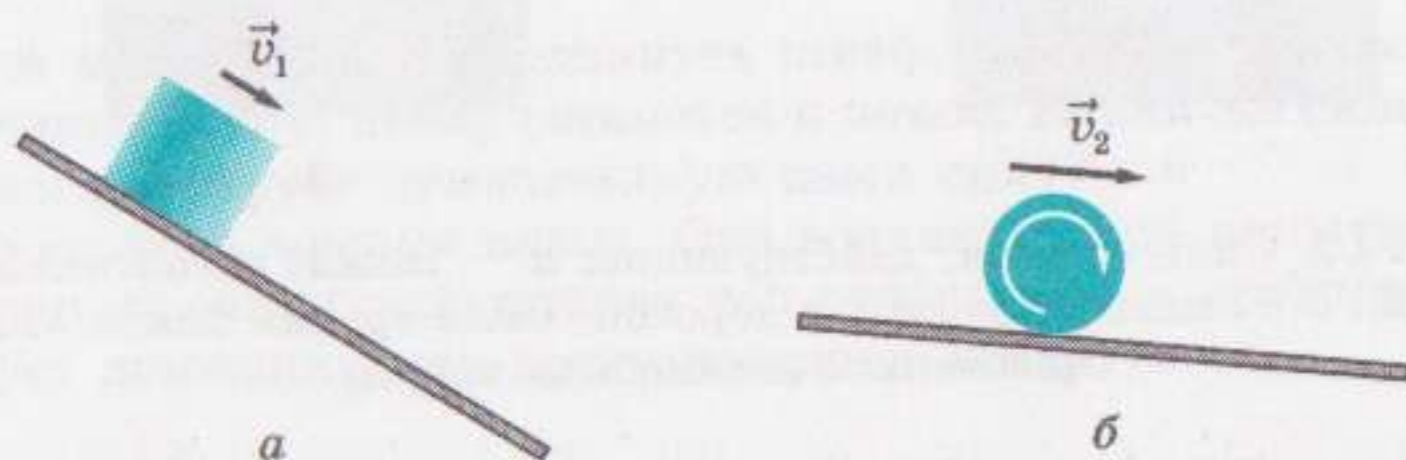


Рис. 14.3. Сравнение силы трения скольжения и качения. Даже при значительном уменьшении угла наклона плоскости цилиндр скатывается быстрее, чем соскальзывает: $v_2 > v_1$

ИЗ-ЗА ЧЕГО ВОЗНИКАЕТ СИЛА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ?

При качении тело деформирует все новые и новые участки поверхности (рис. 14.4). Это является одной из причин возникновения силы трения качения. Другой причиной является преодоление сил межмолекулярного притяжения между катящимся телом и поверхностью.

Обычно трение качения тем меньше, чем *тверже* поверхности соприкасающихся тел: понаблюдайте, например, как долго катится стальной шарик по стеклу. Вот почему рельсы и колеса вагонов делают из стали, а хорошие дороги делают с твердым покрытием.

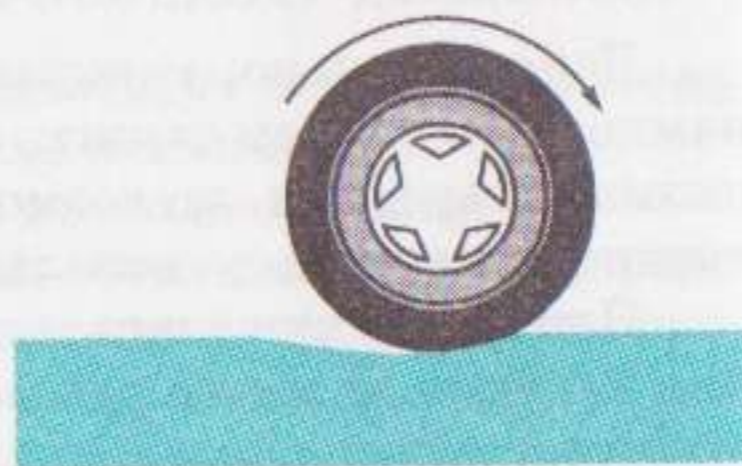


Рис. 14.4. Деформация поверхности при качении тела

4. СИЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

ОТСУТСТВИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ ПОКОЯ

Сдвинуть с места шкаф трудно, а привести в движение находящуюся на воде лодку очень легко. Дело в том, что

в жидкости отсутствует сила трения покоя.

Поместим деревянный брусок в сосуд с водой. Чтобы сдвинуть с места плавающий брусок, достаточно подуть на него (рис. 14.5).

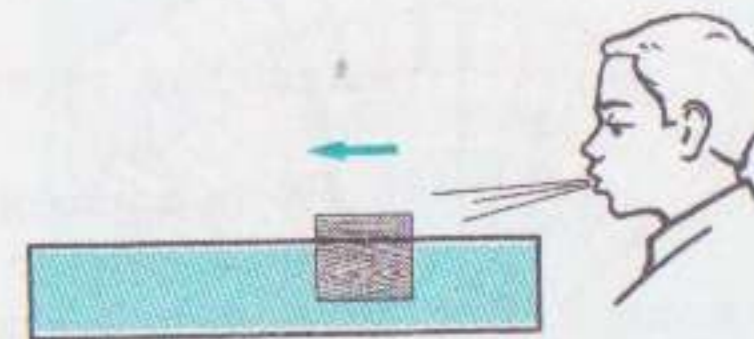


Рис. 14.5. Опыт, доказывающий отсутствие силы трения покоя в жидкости

ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ

Когда тело *движется* в жидкости или газе, на тело действует сила сопротивления, которая быстро *увеличивается с увеличением скорости*. Чтобы уменьшить силу сопротивления воздуха, гоночным автомобилям и самолетам придают обтекаемую каплеобразную форму (рис. 14.6). Подобную форму имеют и самые быстрые обитатели моря — дельфины (рис. 14.6).

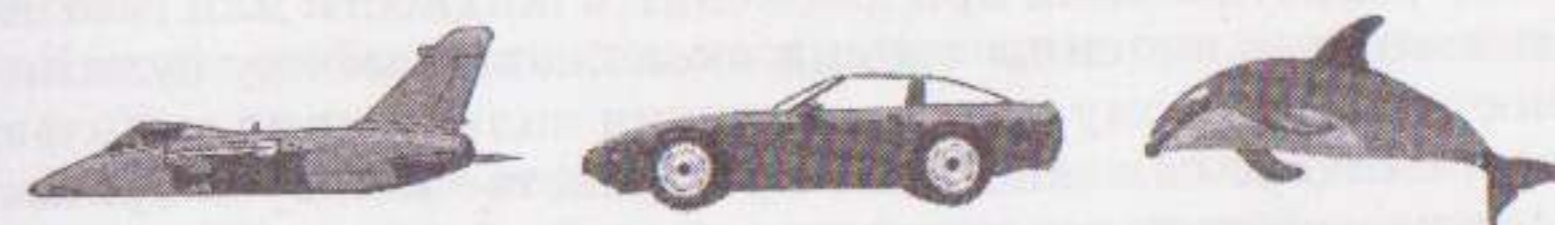


Рис. 14.6. Обтекаемая каплеобразная форма самолетов, спортивных автомобилей и дельфинов

Поставим опыт

Поместим в высокий стеклянный сосуд с водой тело, плотность которого ненамного больше плотности жидкости. Тело начнет тонуть. Мы увидим, что сначала оно движется с ускорением, но постепенно ускорение уменьшается и, наконец, движение тела становится равномерным. Значит, при достижении некоторой скорости тела сила сопротивления жидкости увеличилась настолько, что стала равной по модулю равнодействующей двух сил: силы тяжести и выталкивающей силы (силы Архимеда).

Сила сопротивления в воздухе также увеличивается с увеличением скорости. Поэтому капли дождя вблизи поверхности земли летят уже с постоянной скоростью. Если бы не сопротивление

воздуха, то при падении с высоты два километра капли разогнались бы до скорости самолета — больше семисот километров в час. Удары таких «капелек» были бы весьма ощутимы!

Чтобы уменьшить скорость равномерного движения при падении в воздухе, силу сопротивления воздуха стараются увеличить. Для этого, например, используют парашюты (рис. 14.7).

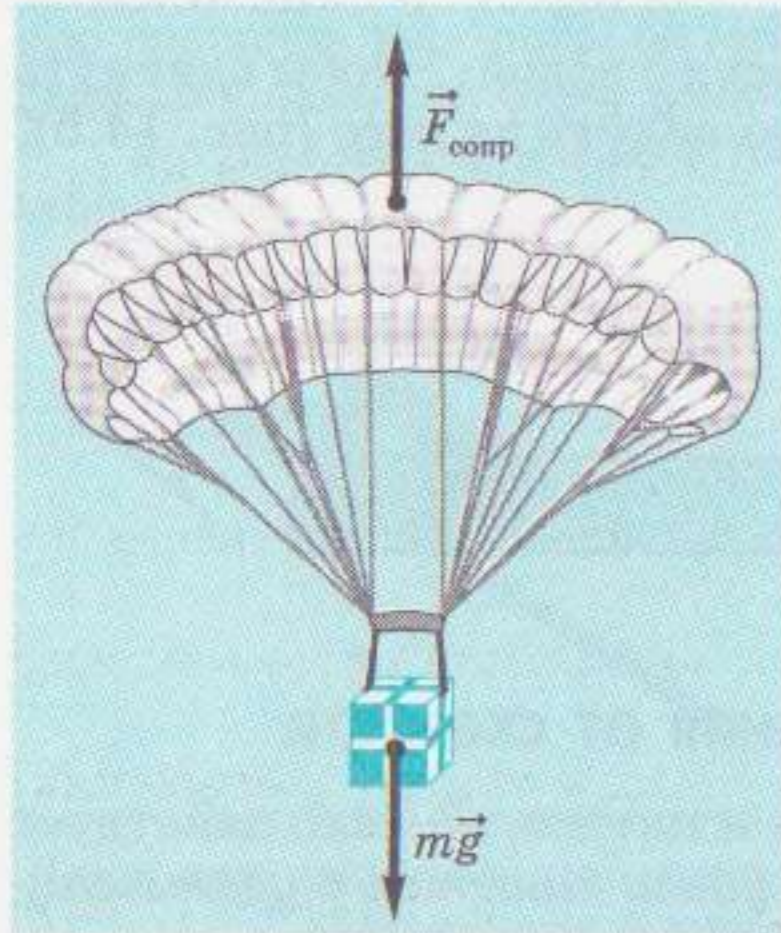


Рис. 14.7. Парашют

Груз или человек на парашюте опускается, двигаясь равномерно, потому что сила сопротивления воздуха уравновешивает силу тяжести.

ЗАЧЕМ ИСПОЛЬЗУЮТ СМАЗКУ?

Сила сопротивления при движении в жидкости или газе обычно намного меньше силы трения скольжения между сухими поверхностями. Поэтому для уменьшения силы трения используют жидкую смазку: она заполняет пространство между соприкасающимися поверхностями, и неровности этих поверхностей перестают зацепляться друг за друга.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Силы трения скольжения возникают между соприкасающимися телами, которые движутся друг относительно друга. Модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр ск}} = \mu N$.
- Сила трения покоя возникает при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого.
- Сила трения качения обычно намного меньше силы трения скольжения. Этим обусловлено использование колеса.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каком случае возникает сила трения скольжения? Чему она равна?
2. Каковы причины возникновения силы трения скольжения?
3. В каком случае возникает сила трения покоя? Каковы причины ее возникновения?
4. Какая сила трения действует между ведущим колесом автомобиля и дорогой, когда автомобиль разгоняется и колеса не проскальзывают?
5. Всегда ли сила трения препятствует движению?
6. Почему трудно идти по льду?
7. Когда колеса автомобиля пробуксовывают?
8. Каковы главные свойства силы трения качения?
- 9*. Попробуйте описать, что случилось бы, если бы силы трения исчезли.
- 10*. Почему формулу для силы трения скольжения нельзя записывать в векторном виде?
- 11*. Чем отличается сила трения покоя от силы трения скольжения? Что у них общего?
- 12*. Приведите примеры, когда сила трения покоя вызывает относительное движение тел.
- 13*. Чтобы тянуть брусок по столу, надо приложить к нему горизонтально направленную силу, равную по модулю половине веса бруска. Чему равен коэффициент трения между бруском и столом?
- 14*. Каковы особенности силы сопротивления при движении в жидкости или газе?
- 15*. У двух учеников спросили: «Действует ли сила трения на стул, стоящий на полу?» Один ответил «нет», а другой — «да». А как думаете вы?
- 16*. Почему смазка уменьшает силу трения?

§ 15. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ДИНАМИКЕ

1. Движение под действием сил тяготения
2. Движение под действием нескольких сил

1. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ТЯГОТЕНИЯ

Задача 1. СПУТНИК СВЯЗИ

Искусственные спутники Земли, предназначенные для систем связи и ретрансляции телевизионных программ, запускают часто на такую орбиту, двигаясь по которой спутник как бы зависает над одной и той же точкой поверхности Земли. Чему равен радиус орбиты такого спутника? Радиус Земли примите равным 6400 км.

Решение

Чтобы спутник находился все время над одной и той же точкой поверхности Земли, он должен совершать один оборот вокруг Земли ровно за одни сутки. Таким образом, период обращения спутника $T = 24 \text{ ч} \approx 8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$. Обозначим скорость спутника v , а радиус его орбиты R .

При движении вокруг Земли спутник движется с центростремительным ускорением $a = \frac{v^2}{R}$. Это ускорение сообщает спутнику

сила притяжения к Земле $F = G \frac{mM_{\text{Зем}}}{R^2}$, где m — масса спутника.

Используя второй закон Ньютона, получаем $\frac{mv^2}{R} = G \frac{mM_{\text{Зем}}}{R^2}$, откуда

$\frac{v^2}{R} = G \frac{M_{\text{Зем}}}{R^2}$. Из этой формулы, пользуясь тем, что $v = \frac{2\pi R}{T}$, полу-

чаем $R^3 = \frac{GM_{\text{Зем}}}{4\pi^2} T^2$. Массу Земли можно выразить через ускорение

свободного падения, используя формулу $g = G \frac{M_{\text{Зем}}}{R_{\text{Зем}}^2}$ (см. § 11. *Всемирное тяготение*).

В результате получаем $R = R_{\text{Зем}} \sqrt[3]{\frac{gT^2}{4\pi^2 R_{\text{Зем}}}} \approx 6,6R_{\text{Зем}} \approx 42\,000 \text{ км}$.

Задача 2. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ И ТРЕТИЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА

Докажите, используя закон всемирного тяготения, что для всех планет Солнечной системы отношение $\frac{R^3}{T^2}$, где R — радиус орбиты планеты, T — период ее обращения вокруг Солнца, *одинаково* (третий закон Кеплера).

Решение

Действуя так же, как и в предыдущей задаче, получаем, что $R^3 = \frac{GM_{\text{С}}}{4\pi^2} T^2$, где $M_{\text{С}}$ — масса Солнца. Отсюда следует, что

$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM_{\text{С}}}{4\pi^2}$, то есть отношение $\frac{R^3}{T^2}$ зависит *только от массы Солнца*

и поэтому для всех планет Солнечной системы одинаково.

Задача 3. СОЛНЦЕ, ЗЕМЛЯ И ЛУНА

К чему Луна притягивается сильнее: к Земле или к Солнцу? Среднее расстояние от Земли до Солнца примите равным 150 миллионов километров, а от Земли до Луны — 380 тысяч километров. Массы Солнца и Земли равны соответственно $M_{\text{С}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ и $M_{\text{Зем}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Решение

Согласно закону всемирного тяготения $F_{\text{ЛЗем}} = G \frac{M_{\text{Л}}M_{\text{Зем}}}{R_{\text{ЛЗем}}^2}$ и

$F_{\text{ЛС}} = G \frac{M_{\text{Л}}M_{\text{С}}}{R_{\text{ЛС}}^2}$, где $F_{\text{ЛЗем}}$ и $F_{\text{ЛС}}$ — силы притяжения Луны к Земле и

к Солнцу, $R_{\text{ЛЗем}}$ и $R_{\text{ЛС}}$ — расстояния от Луны до Земли и от Луны до Солнца.

Расстояние от Луны до Солнца можно принять равным заданному в условии расстоянию от Земли до Солнца (так как оно во много раз больше расстояния от Земли до Луны). Поэтому полу-

чаем $\frac{F_{\text{ЛС}}}{F_{\text{ЛЗем}}} = \frac{M_{\text{С}}}{M_{\text{Зем}}} \cdot \frac{R_{\text{ЛЗем}}^2}{R_{\text{ЛС}}^2} \approx 2,2$.

Итак, сила притяжения Луны к Солнцу более чем вдвое превышает силу притяжения Луны к Земле.

2. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

Задача 4. УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

На наклонную плоскость с углом наклона α кладут брусок. Коэффициент трения между бруском и плоскостью μ . При каком соотношении между α и μ брусок останется в покое?

Решение

На покоящийся брусок действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции \vec{N} и сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр пок}}$, направленная вдоль наклонной плоскости вверх.

Направим ось x вдоль наклонной плоскости вниз, а ось y — перпендикулярно плоскости, как показано на чертеже (рис. 15.1).

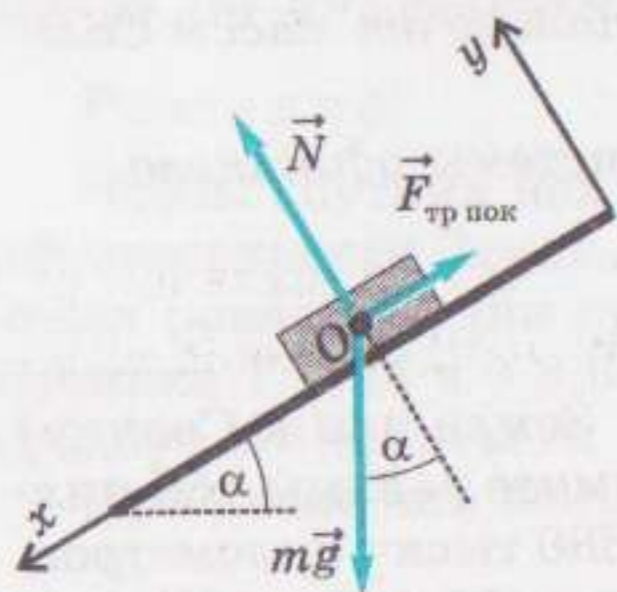


Рис. 15.1. Силы, действующие на брусок, покоящийся на наклонной плоскости

Сила трения покоя компенсирует равнодействующую силы тяжести и силы нормальной реакции.

Так как брусок покоится, равнодействующая всех приложенных к нему сил равна нулю, то есть $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр пок}} = 0$. Отсюда в проекциях на оси координат получаем систему уравнений:

$$\boxed{x} \quad mg \sin \alpha - F_{\text{тр пок}} = 0,$$

$$\boxed{y} \quad -mg \cos \alpha + N = 0.$$

Кроме того, поскольку сила трения покоя не может превышать силу трения скольжения, выполняется неравенство $F_{\text{тр пок}} \leq \mu N$.

Из первого уравнения системы следует, что $F_{\text{тр пок}} = mg \sin \alpha$, а из второго, что $N = mg \cos \alpha$. Подставляя эти выражения в неравенство $F_{\text{тр пок}} \leq \mu N$, получаем $mg \sin \alpha \leq \mu mg \cos \alpha$, то есть $\tan \alpha \leq \mu$.

Таким образом, брусок может покоиться на наклонной плоскости, если $\tan \alpha \leq \mu$.

Определение коэффициента трения на опыте

Положим брусок на горизонтальную плоскость и будем постепенно увеличивать угол наклона плоскости. Согласно изложен-

ному выше брусок начнет соскальзывать с наклонной плоскости, когда перестанет выполняться условие $\tan \alpha \leq \mu$. Приблизительно можно считать, что «предельный» угол наклона плоскости (когда брусок еще покоится на ней) удовлетворяет условию $\tan \alpha = \mu$. Тангенс угла наклона плоскости равен отношению высоты плоскости к длине ее основания. Определив значение тангенса угла, при котором начинается соскальзывание бруска, мы узнаем и коэффициент трения между бруском и плоскостью.

Задача 5. УСКОРЕНИЕ ТЕЛА, СОСКАЛЫЗЫВАЮЩЕГО С НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Брусок положили на наклонную плоскость, и он начал соскальзывать с нее. Каково ускорение бруска, если угол наклона плоскости α , а коэффициент трения между бруском и плоскостью μ ?

Решение

На брусок действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции \vec{N} и сила трения скольжения $F_{\text{тр ск}} = \mu N$, направленная вдоль наклонной плоскости вверх (рис. 15.2).

Согласно второму закону Ньютона $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр ск}} = m\vec{a}$. В проекциях на оси координат получаем:

$$\boxed{x} \quad mg \sin \alpha - F_{\text{тр ск}} = ma,$$

$$\boxed{y} \quad -mg \cos \alpha + N = 0.$$

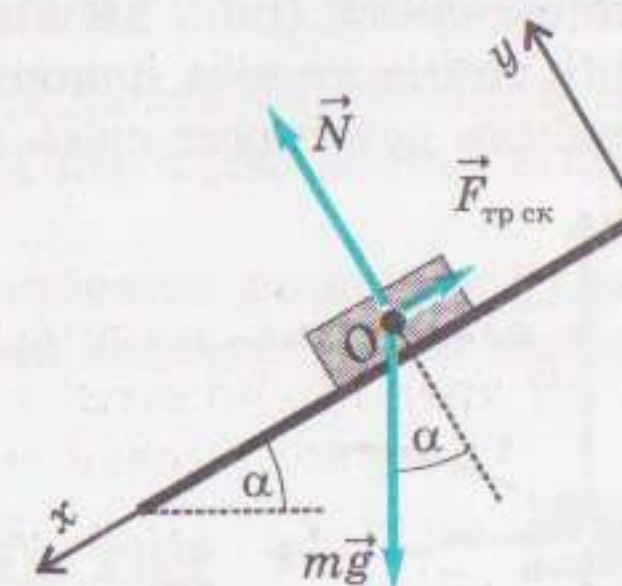


Рис. 15.2. Силы, действующие на брусок, скользящий по наклонной плоскости. На брусок в этом случае действует сила трения скольжения

Из второго уравнения системы $N = mg \cos \alpha$. Так как $F_{\text{тр ск}} = \mu N$, то $F_{\text{тр ск}} = \mu mg \cos \alpha$. Тогда из первого уравнения системы находим, что ускорение бруска $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$. Эта величина положительна, поскольку по условию брусок начал соскальзывать с плоскости, то есть $\tan \alpha > \mu$ или, что то же самое, $\sin \alpha > \mu \cos \alpha$.

Задача 6. ПОВОРОТ АВТОМОБИЛЯ

Автомобиль совершает поворот на городском перекрестке по дуге окружности радиусом R . Какова максимально допустимая скорость автомобиля при повороте, если коэффициент трения между шинами и асфальтом равен μ ?

Решение

Автомобиль на повороте движется по дуге окружности, значит, ускорение автомобиля \vec{a} направлено по горизонтали к центру окружности (рис. 15.3). При равномерном движении по окружности ускорение, скорость и радиус связаны соотношением $a = \frac{v^2}{R}$ (см. § 4. Криволинейное движение).

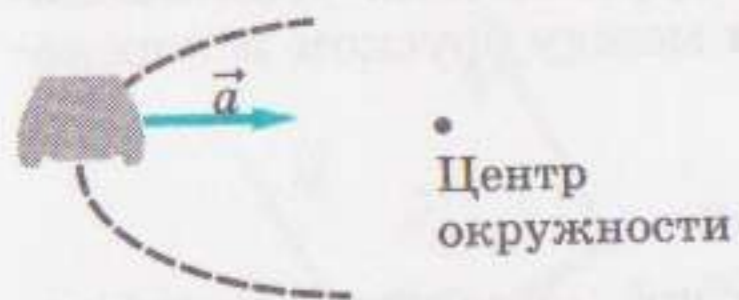


Рис. 15.3. Ускорение автомобиля при повороте

Ускорение направлено к центру окружности, по дуге которой едет автомобиль.

Ускорение автомобилю сообщает равнодействующая всех приложенных к нему сил. Сила тяжести $m\vec{g}$ и сила нормальной реакции \vec{N} направлены вертикально и компенсируют друг друга. Откуда же берется направленная по горизонтали сила, вызывающая горизонтально направленное ускорение \vec{a} ?

Этой силой является сила трения, действующая на колеса со стороны дороги и направленная по горизонтали перпендикулярно скорости (рис. 15.4). При качении без проскальзывания нижняя точка колеса покоится относительно дороги, то есть на автомобиль действует сила трения покоя.



Рис. 15.4. Силы, действующие на автомобиль при повороте

Сила тяжести и сила нормальной реакции компенсируют друг друга; ускорение автомобилю сообщает сила трения покоя между колесами и дорогой.

Согласно второму закону Ньютона $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр пок}} = m\vec{a}$.

Чтобы записать уравнение второго закона Ньютона в проекциях на оси координат, совместим начало координат с положени-

ем автомобиля в данный момент, направим ось x горизонтально вдоль радиуса окружности к ее центру, а ось y — вертикально вверх. Мы получим:

$$\boxed{x} F_{\text{тр пок}} = m \frac{v^2}{R},$$

$$\boxed{y} N - mg = 0.$$

Как мы уже знаем, для силы трения покоя справедливо неравенство $F_{\text{тр пок}} \leq \mu N$.

Из второго уравнения системы следует, что $N = mg$. Подставим это выражение для N и выражение для $F_{\text{тр пок}}$ из первого уравнения в неравенство $F_{\text{тр пок}} \leq \mu N$. Мы получим: $\frac{mv^2}{R} \leq \mu mg$.

Отсюда $v \leq \sqrt{\mu Rg}$. Это и есть искомое ограничение для допустимой скорости на повороте.

Пример

Радиус поворота на городском перекрестке около 5 м, а коэффициент трения между шинами и сухим асфальтом можно для оценки принять равным 0,5. Подставляя эти числовые данные, получаем, что скорость автомобиля на повороте не может превышать 5 м/с = 18 км/ч.

Это значительно меньше максимально допустимой скорости автомобиля при движении в городе (60 км/ч), поэтому перед поворотом водитель всегда притормаживает.

При гололеде коэффициент трения между шинами и дорогой уменьшается до 0,2. Поэтому ограничение на скорость при повороте становится еще более строгим: подставляя $\mu = 0,2$ в формулу $v \leq \sqrt{\mu Rg}$, получаем, что при гололеде скорость автомобиля на повороте не может превышать 3,1 м/с \approx 11 км/ч (скорость легкой пробежки).

Если скорость автомобиля при выполнении поворота будет больше указанной, автомобиль непременно «занесет», что может привести даже к аварии.

Задача 7. ДВИЖЕНИЕ СВЯЗАННЫХ ТЕЛ

Два груза массами m_1 и m_2 соединены нерастяжимой нитью, переброшенной через неподвижный блок (рис. 15.5), причем $m_2 > m_1$. Каковы ускорения грузов и сила натяжения нити? Вес какого груза больше?

Считайте, что массами блока и нити, а также трением в блоке можно пренебречь.

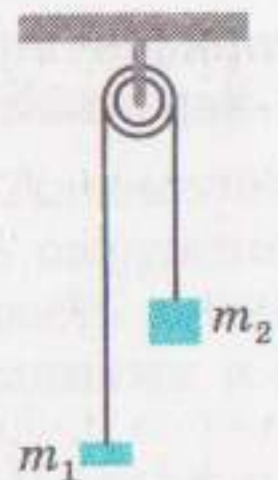


Рис. 15.5. К условию задачи 7

Решение

На каждый из грузов действуют две силы: сила тяжести и сила натяжения нити.

Указание на то, что массами блока и нити, а также трением в блоке можно пренебречь, означает, что сила натяжения нити по обе стороны от блока одинакова, то есть нить действует на каждый из грузов с одной и той же силой, которую мы обозначим \vec{T} (рис. 15.6).

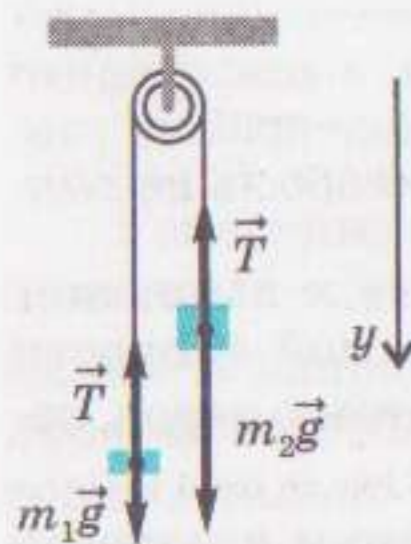


Рис. 15.6. К решению задачи 7

Изобразены силы, действующие на каждый из грузов.

Уравнения второго закона Ньютона для грузов имеют вид:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{g} + \vec{T} &= m_1 \vec{a}_1, \\ m_2 \vec{g} + \vec{T} &= m_2 \vec{a}_2. \end{aligned}$$

Поскольку нить нерастяжима, модули перемещений, а следовательно, модули скоростей и ускорений грузов равны. Обозначим модуль ускорения грузов a . Тогда в проекциях на направленную вниз ось y получим систему уравнений:

$$\begin{cases} m_1 g - T = -m_1 a, \\ m_2 g - T = m_2 a. \end{cases}$$

Вычитая из второго уравнения первое, получаем, что

$$g(m_2 - m_1) = a(m_2 + m_1). \text{ Отсюда } a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}.$$

Заметим теперь, что сила натяжения нити — это как раз и есть вес *каждого* из грузов: ведь вес — это сила, с которой тело

растягивает подвес (см. § 13. *Вес и невесомость*). Из первого уравнения системы получаем, что $T = m_1(g + a)$, а из второго — что $T = m_2(g - a)$. Это — выражения для веса тела, движущегося с ускорением, направленным соответственно вверх и вниз. То, что грузы *разной* массы имеют *один и тот же* вес, объясняется тем, что грузы движутся с *ускорением*.

Подставляя найденное выше выражение для a в любое из двух приведенных выражений для силы натяжения нити, получаем

$$T = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

$$\text{Этому же выражению равен и вес каждого из грузов: } P_1 = P_2 = 2g \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Пример анализа решения

Покажем на примере этой задачи, как проанализировать *уже полученный* ответ: во-первых, это позволит убедиться в его правильности, а во-вторых, поможет наглядно представить ответ, что способствует развитию физической интуиции.

1. Если массы грузов равны ($m_1 = m_2 = m$), то из формулы

$$a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$$

следует, что ускорение грузов равно нулю, то есть они движутся равномерно или покоятся (в зависимости от начального состояния). При этом натяжение нити и вес каждого из грузов равен mg .

2. Если масса второго груза намного больше массы первого груза ($m_2 \gg m_1$), то в числителе и знаменателе выражения для ускорения

$$a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$$

можно пренебречь m_1 по сравнению с m_2 . В результате получим, что $a \approx g$, то есть грузы движутся с ускорением, почти равным по модулю ускорению свободного падения. При этом ускорение более массивного груза направлено вниз, то есть этот груз падает, практически «не замечая» менее массивного груза.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1*. Каков период обращения искусственного спутника, если он находится от поверхности Земли на расстоянии, равном радиусу Земли?

- 2*. Оцените, чему равна первая космическая скорость для запуска искусственного спутника с поверхности Луны. Для оценки примите, что масса Луны в 80 раз меньше массы Земли, а радиус Луны в 4 раза меньше радиуса Земли.
- 3*. Два спутника движутся вокруг Земли по круговым орбитам. Радиус орбиты первого спутника в 4 раза больше, чем радиус орбиты второго спутника. У какого спутника период обращения больше? Во сколько раз больше?
- 4*. К чему Солнце притягивается сильнее — к Земле или к Луне? Во сколько раз сильнее?
- 5*. На книге лежит брусок. На какой угол надо наклонить книгу, чтобы брусок начал скользить по ней? Коэффициент трения между книгой и бруском равен 0,5.
- 6*. Брусок после толчка скользит вверх по наклонной плоскости. Изобразите схематически силы, действующие на брусок.
- 7*. Каков минимальный радиус окружности, по которой может ехать автомобиль со скоростью 60 км/ч? Найдите сами в учебнике нужные вам дополнительные данные.
- 8*. На нити, переброшенной через блок, подвешены грузы. Масса первого груза в 2 раза больше, чем масса второго груза. С каким ускорением движутся грузы? Трением в оси блока, а также массами блока и нити можно пренебречь.



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- Воздействие других тел на данное тело проявляется в том, что они *изменяют скорость* этого тела.
- **Первый закон Ньютона:** существуют системы отсчета (называемые инерциальными), относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.
- **Принцип относительности Галилея:** во всех инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.
- В механике изучают три вида сил: *силы всемирного тяготения, силы упругости и силы трения.*
- **Сила упругости** возникает при деформации тела. Причиной возникновения силы упругости является взаимодействие молекул тела. Сила упругости подчиняется **закону Гука:** $F_x = -kx$.

- **Второй закон Ньютона:** равнодействующая \vec{F} всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$. Второй закон Ньютона можно записать также в виде $m\vec{a} = \vec{F}$ или $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.
- **Третий закон Ньютона:** тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Эти силы имеют одну и ту же физическую природу и не компенсируют 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 с силами, прямо пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними. Модуль каждой силы $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$. Гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{кг}^2$.
- Сила притяжения, действующая на тело со стороны Земли, называется *силой тяжести*. Сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$.
- **Весом тела** называется сила, с которой тело, вследствие его притяжения к Земле, давит на опору или растягивает подвес.
- **Вес \vec{P}** покоящегося тела массой m равен $m\vec{g}$.
- Состояние, при котором вес тела равен нулю, называют *состоянием невесомости*. Тело находится в состоянии невесомости, когда оно движется с ускорением свободного падения, то есть когда на него действует только сила тяжести.
- **Силы трения скольжения** возникают между соприкасающимися телами, которые движутся друг относительно друга. Модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр ск}} = \mu N$.
- **Сила трения покоя** возникает при попытке сдвинуть одно из соприкасающихся тел относительно другого.
- **Сила трения качения** обычно намного меньше силы трения скольжения. Этим обусловлено использование колеса.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ «ДИНАМИКА»

1. Один из ученых 15-го века так обосновывал неподвижность Земли: «Если бы Земля летела через воздух, птицы не могли бы возвращаться к своим гнездам». Как бы вы возразили этому ученому?
2. Многие воздухоплаватели отмечали, что при полете на воздушном шаре они ощущали полное безветрие, даже если шар несло сильным ветром. Как это объяснить?
3. Чему равна сила тяжести, действующая на человека массой 60 кг?
4. Оцените, с какой силой притягиваются два человека массой 60 кг каждый, находясь на расстоянии 1 м друг от друга.
5. С какой силой притягивается к Земле тело массой 1 кг, находящееся вблизи поверхности Земли?
6. Может ли человек массой 70 кг притягивать какое-либо тело с силой, примерно равной 700 Н?
7. Может ли мяч во время полета изменить направление движения на противоположное, ни с чем не столкнувшись?
8. Человек утверждает, что его вес — 60 килограммов. Каков его вес на самом деле?
9. Лифт движется вверх. В какие моменты вес пассажира больше силы тяжести: когда лифт разгоняется или когда он тормозит? Изменятся ли ответы, если лифт движется вниз?
10. Сколько будет весить человек массой 60 кг, оказавшись на поверхности Луны? Примите, что ускорение свободного падения на Луне в 6 раз меньше, чем на Земле.
11. Камень брошен вертикально вверх. В какие моменты полета он находится в состоянии невесомости? Изменится ли ответ, если камень брошен под углом к горизонту? Считайте, что сопротивлением воздуха можно пренебречь.

Глава 3 ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ



Во многих случаях детали взаимодействий тел неизвестны: например, трудно определить силы, с которыми действуют друг на друга сталкивающиеся тела. Трудно определить также силы, действующие на тело, когда оно движется по криволинейной траектории.

Однако в подобных случаях часто удается предсказать результат взаимодействия тел, используя законы сохранения, которые являются следствиями законов движения и свойств сил, действующих между телами.

В этой главе рассмотрены законы сохранения импульса и механической энергии.

1. Импульс и закон сохранения импульса
2. Примеры применения закона сохранения импульса

В этом параграфе мы введем понятия импульса тела и импульса силы. Покажем, что следствием второго и третьего законов Ньютона является сохранение суммарного импульса замкнутой системы тел.

1. ИМПУЛЬС И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ

Пусть на тело массой m действует сила \vec{F} в течение промежутка времени Δt . Запишем второй закон Ньютона в виде $m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}$, откуда следует, что $m \Delta \vec{v} = \vec{F} \Delta t$. Левую часть этого уравнения можно записать в виде $\Delta(m\vec{v})$, поэтому получаем $\Delta(m\vec{v}) = \vec{F} \Delta t$.

Произведение массы тела на его скорость называют импульсом тела (или просто импульсом): $\vec{p} = m\vec{v}$, а произведение силы на промежуток времени, в течение которого действует сила $\vec{F} \Delta t$, — импульсом силы.

Таким образом, используя понятия импульса тела и импульса силы, второй закон Ньютона можно сформулировать так¹:

изменение импульса тела равно импульсу действующей на это тело силы: $\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Напомним, что систему тел, взаимодействующих только друг с другом и не взаимодействующих ни с какими другими телами, называют *замкнутой*. Покажем, что векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, сохраняется.

Рассмотрим сначала случай, когда друг с другом взаимодействуют только два тела.

Обозначим \vec{F}_1 силу, действующую на первое тело со стороны второго, а \vec{F}_2 — силу, действующую на второе тело со стороны

¹ Именно в таком виде его сформулировал сам Ньютон.

первого. Используя второй закон Ньютона в виде $\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$, получаем для изменения импульсов тел $\Delta \vec{p}_1 = \vec{F}_1 \Delta t$, $\Delta \vec{p}_2 = \vec{F}_2 \Delta t$. Согласно третьему закону Ньютона $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$, поэтому $\Delta \vec{p}_1 = -\Delta \vec{p}_2$. Следовательно, $\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = 0$. Запишем это соотношение в виде $\Delta(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0$.

Мы видим, что при взаимодействии тел друг с другом *изменение суммы их импульсов равно нулю*. А если изменение некоторой величины равно нулю, то это означает, что эта величина *сохраняется*.

Пример

Если взаимодействуют друг с другом два тела массами m_1 и m_2 , то согласно закону сохранения импульса $m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$, где \vec{v}_1 и \vec{v}_2 — скорости тел в какой-либо один момент времени, а \vec{u}_1 и \vec{u}_2 — скорости этих же тел в любой другой момент времени.

Подобным же образом можно доказать, что суммарный импульс сохраняется и для системы, состоящей из нескольких тел, — важно лишь, чтобы эта система тел была *замкнутой*. Итак, следствием второго и третьего законов Ньютона является

закон сохранения импульса: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется.

2. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Мы показали, что закон сохранения импульса выполняется для замкнутых систем тел. Однако *абсолютно замкнутых систем в природе не существует*. Поэтому возникает вопрос: *в каких случаях можно применять закон сохранения импульса к незамкнутым системам тел?*

Рассмотрим эти случаи.

ВНЕШНИЕ СИЛЫ КОМПЕНСИРУЮТ ДРУГ ДРУГА

Если внешние силы, действующие на тела системы, компенсируют друг друга, то действие этих сил не изменяет скоростей, а значит, и импульсов тел системы. Следовательно, в этом случае сумма импульсов тел системы также сохраняется.

Пример

Пусть два мальчика массами m_1 и m_2 начинают соревноваться в перетягивании каната, стоя на легких тележках (рис. 16.1). Если трением можно

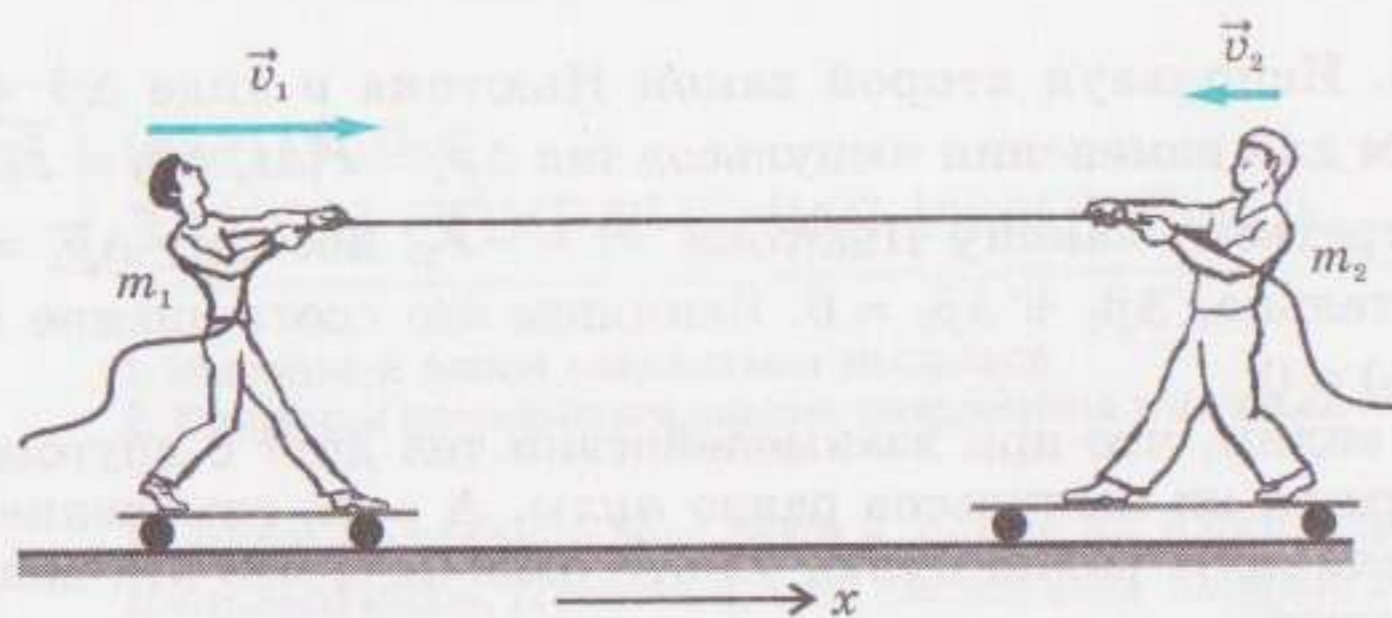


Рис. 16.1. «Перетягивание каната» мальчиками, стоящими на тележках. Скорость более легкого мальчика больше

пренебречь, то силы, действующие на мальчиков со стороны других тел (сила тяжести и сила нормальной реакции пола), компенсируют друг друга. Следовательно, сумма импульсов мальчиков сохраняется (будем считать, что массы тележек пренебрежимо малы по сравнению с массами мальчиков).

Поскольку в начальный момент мальчики находились в покое, их суммарный импульс в начальный момент времени был равен нулю. Согласно закону сохранения импульса суммарный импульс останется равным нулю и при движении мальчиков — независимо от того, тянут ли они канат рывками или плавно, перебирает ли канат руками только один из мальчиков или оба. Таким образом, $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0$, где \vec{v}_1 и \vec{v}_2 — скорости мальчиков в произвольный момент времени (до тех пор, пока мальчики взаимодействуют только друг с другом, а действия всех других тел на них компенсируются).

Из уравнения $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0$ следует, что $m_2\vec{v}_2 = -m_1\vec{v}_1$ или, в проекциях на ось x , $m_2v_{2x} = -m_1v_{1x}$. Разные знаки проекций скоростей мальчиков означают, что их скорости направлены противоположно (если выбрать ось x , как показано на рис. 16.1, то $v_{1x} = v_1$, $v_{2x} = -v_2$). Из уравнения $m_2v_{2x} = -m_1v_{1x}$ для проекций получаем уравнение для модулей скоростей: $m_1v_1 = m_2v_2$, откуда следует, что $\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$, то есть отношение скоростей мальчиков обратно пропорционально отношению их масс.

ПРОЕКЦИЯ ВНЕШНИХ СИЛ НА НЕКОТОРОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАВНА НУЛЮ

Если проекции внешних сил на какую-либо координатную ось равны нулю, то сохраняется проекция суммарного импульса тел системы на эту же координатную ось.

Пример

В движущуюся со скоростью v_1 тележку массой m_T падает груз массой m_g (рис. 16.2). Будем считать, что трением между тележкой и полом можно пренебречь.

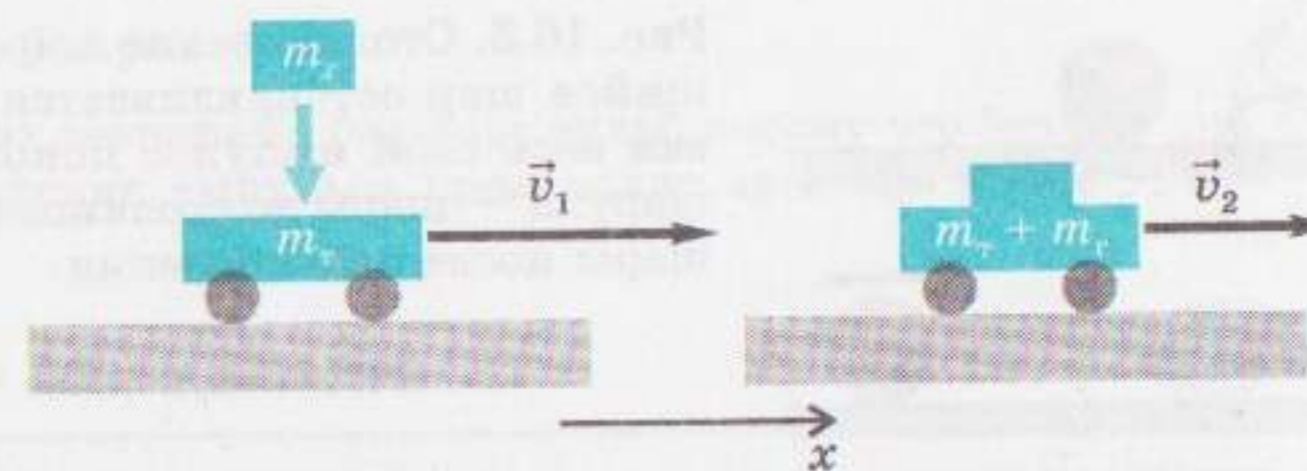


Рис. 16.2. Перераспределение импульса между тележкой и грузом

В данном случае горизонтальные внешние силы на систему тел «тележка + груз» не действуют. Поэтому сохраняется проекция суммарного импульса тележки и груза на ось x , направленную вдоль начальной скорости тележки. Обозначим начальную скорость тележки \vec{v}_1 , а скорость тележки вместе с грузом \vec{v}_2 .

В начальный момент проекция импульса системы «тележка + груз» на ось x равна $m_T v_{1x}$. После падения груза в тележку они движутся как единое целое со скоростью \vec{v}_2 , поэтому проекция импульса системы «тележка + груз» на ось x равна $(m_T + m_g)v_{2x}$. Следовательно, $(m_T + m_g)v_{2x} = m_T v_{1x}$. Отсюда получаем $v_{2x} = \frac{v_{1x} m_T}{(m_T + m_g)}$.

Проанализируем полученную формулу, чтобы представить результат взаимодействия (иначе формула останется только набором знаков!).

Прежде всего заметим, что $v_{2x} < v_{1x}$, то есть скорость тележки после падения в нее груза уменьшилась: начальный горизонтально направленный импульс тележки распределился между тележкой и грузом.

Если массы тележки и груза равны, то скорость тележки уменьшится вдвое. Если масса груза намного меньше массы тележки, то скорость тележки практически не изменится, так как при $m_g \ll m_T$ получаем $v_{2x} \approx v_{1x}$. А если, наоборот, масса груза намного больше массы тележки, то после падения груза скорость тележки значительно уменьшится: при $m_g \gg m_T$ получаем $v_{2x} \ll v_{1x}$.

УДАРЫ, СТОЛКНОВЕНИЯ, РАЗРЫВЫ, ВЫСТРЕЛЫ

Если тела взаимодействуют друг с другом в течение очень короткого промежутка времени, то взаимодействием данных тел с другими телами в течение этого промежутка времени можно пренебречь. В таком случае систему тел приближенно можно считать замкнутой. (Примеры применения закона сохранения импульса в подобных случаях см. также в § 20. Примеры решения задач на законы сохранения.)

Поставим опыт

Если катящийся бильярдный шар встречается точно на своем пути покоящийся шар, он передает ему свою скорость (и, следовательно, свой импульс), а сам останавливается (рис. 16.3). Очевидно, что при этом суммарный импульс шаров сохраняется.

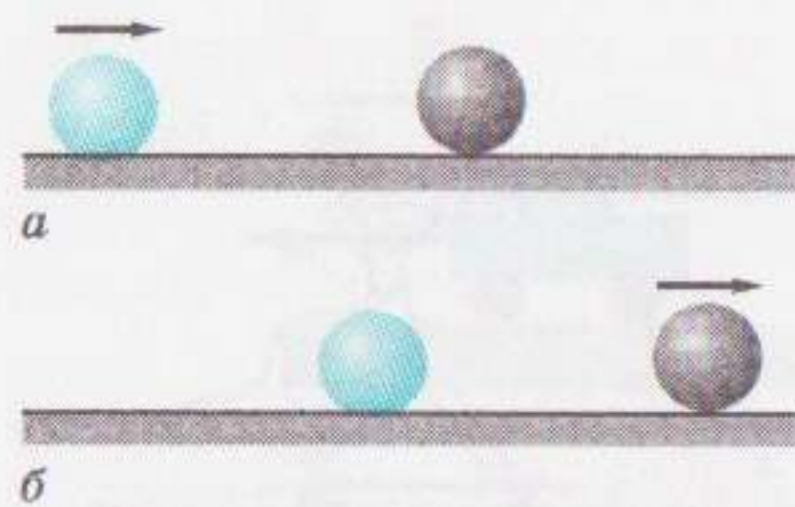


Рис. 16.3. Столкновение шаров. Катящийся шар останавливается, передавая весь свой импульс покоящемуся шару: *a* — шары до столкновения; *b* — шары после столкновения

В этом опыте шары можно заменить тележками равной массы.

Пример

При выстреле из пушки в горизонтальном направлении силы взаимодействия между пушкой и ядром при движении ядра в стволе пушки намного больше, чем все другие горизонтальные силы, действующие на эти тела (рис. 16.4). Поэтому систему «пушка + ядро» можно приближенно считать замкнутой и применить к ней закон сохранения импульса.

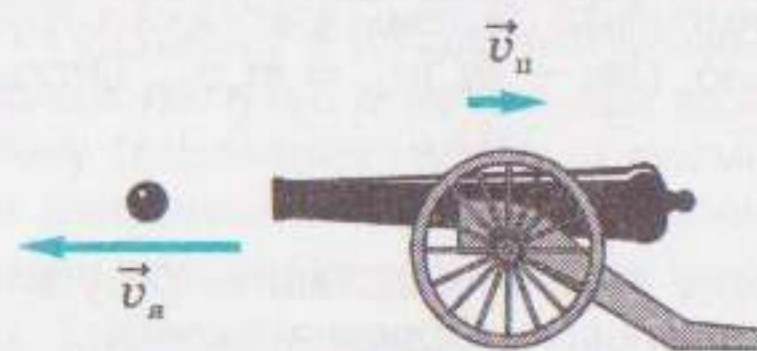


Рис. 16.4. Отдача пушки при выстреле

Обозначим массы ядра и пушки $m_я$ и $m_п$, а их скорости непосредственно после выстрела $\vec{v}_я$ и $\vec{v}_п$. Вначале пушка и ядро покоились, поэтому из закона сохранения импульса получаем $m_п \vec{v}_п + m_я \vec{v}_я = 0$. Отсюда $\vec{v}_п = -\frac{m_я \vec{v}_я}{m_п}$. Знак «минус» означает, что в результате отдачи пушка покати-

лась в направлении, противоположном направлению скорости ядра. Скорость пушки тем меньше, чем больше ее масса.

Почему при ударе возникают большие силы?

Из формулы $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ следует, что если большое изменение импульса тела происходит за очень короткий промежуток времени, то возникают большие силы (удар, толчок, столкновение).

Пример

Молоток непосредственно перед ударом имеет большой импульс $m\vec{v}$, а после удара его импульс становится практически равным нулю. Большое изменение импульса происходит за очень малое время, чем и обусловлена большая сила удара (рис. 16.5). По той же причине возникают огромные силы и при столкновении автомобилей, особенно если их относительная скорость велика (поэтому наиболее опасно столкновение встречных автомобилей).

Рис. 16.5. Удар

При ударах возникают большие силы, потому что большое изменение импульса происходит за очень малое время.



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Импульсом тела \vec{p} называют векторную величину, равную произведению массы тела на его скорость: $\vec{p} = m\vec{v}$.
- Закон сохранения импульса: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чему равен импульс тела?
2. Сохраняется ли импульс тела, если на него не действуют другие тела?
3. Как связано изменение импульса тела с импульсом действующей на это тело силы?
4. Что такое замкнутая система тел?
5. Сформулируйте закон сохранения импульса.
6. Почему при ударе возникают большие силы?
- 7*. По шоссе движутся легковой автомобиль и грузовик. Масса грузовика в 6 раз больше массы легкового автомобиля. С какой скоростью едет грузовик, если его импульс в 3 раза больше импульса легкового автомобиля, скорость которого 60 км/ч?
- 8*. Зависит ли импульс тела от выбора системы отсчета?
- 9*. С какими законами Ньютона связан закон сохранения импульса?
- 10*. В каких случаях можно использовать закон сохранения импульса для незамкнутых систем?
- 11*. Изменяется ли импульс свободно падающего тела? Если да, то по какой причине?
- 12*. Два снежка равной массы летят навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями. При ударе они слипаются в один большой снежок. Чему равен импульс этого снежка непосредственно после удара?
- 13*. Человек давит на Землю с силой 600 Н в течение 60 лет. Оцените, чему равен импульс этой силы. Изменяется ли импульс Земли в результате взаимодействия с этим человеком?

§ 17.

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ОСВОЕНИЕ КОСМОСА

1. Реактивное движение
2. Развитие ракетостроения и освоение космоса

Закон сохранения импульса наглядно проявляется в реактивном движении, например, когда ракета разгоняется, выбрасывая назад раскаленные газы.

С помощью ракет началось и продолжается освоение космического пространства. В этом параграфе мы расскажем об основных этапах развития ракетостроения и освоения космоса.

1. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

ОТ ЧЕГО ОТТОЛКНУТЬСЯ, ЕСЛИ ВОКРУГ НИЧЕГО НЕТ?

Мы уже знаем, что скорость тела изменяется только при воздействии на это тело других тел.

Примеры

Когда человек разбегается, он отталкивается от дороги, и дорога, согласно третьему закону Ньютона «толкает» человека вперед (см. § 14. Силы трения).

Плывя в лодке, гребец веслами отталкивается от воды, и вода, согласно третьему закону Ньютона «толкает» лодку вперед.

А от чего можно оттолкнуться, если вокруг *ничего нет* — как для ракеты в открытом космосе?

Единственная возможность — *взять с собой то, от чего можно будет отталкиваться.*

Например, лодку можно разогнать и без весел, если заготовить, скажем, достаточным количеством мячей и бросать их из лодки назад, отталкиваясь от них (рис. 17.1).



Рис. 17.1. Способ разогнать лодку без весел

Подобным же образом приходит в движение и пушка при отдаче во время выстрела: «толкая» ядро, пушка, согласно закону сохранения импульса, и сама получает толчок.

Движение, при котором тело изменяет свою скорость, отбрасывая свою часть, называется реактивным движением.

Примером реактивного движения является движение ракеты. Реактивное движение используют не только в технике, но и в природе, — например, каракатица движется, выбрасывая струю воды.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РАКЕТЫ

Из сопла ракеты с огромной скоростью вылетают назад продукты сгорания топлива (раскаленные газы), и согласно закону сохранения импульса сама ракета получает сильнейший толчок вперед (рис. 17.2).

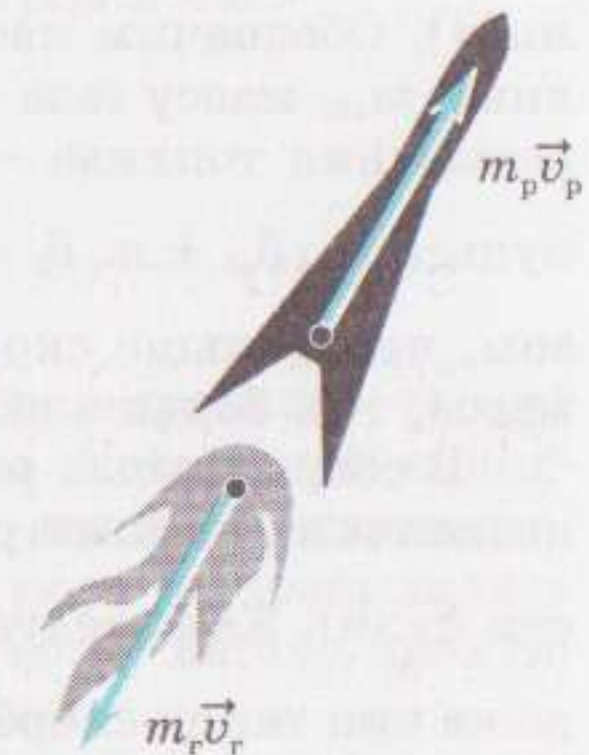


Рис. 17.2. Разгон ракеты

Выбрасывая раскаленные газы назад, ракета устремляется вперед.

Ракеты используют для запуска искусственных спутников Земли, обслуживания орбитальных станций, исследовательских межпланетных полетов.

КАК УСТРОЕНА КОСМИЧЕСКАЯ РАКЕТА?

На рис. 17.3 приведено схематическое устройство ракеты.

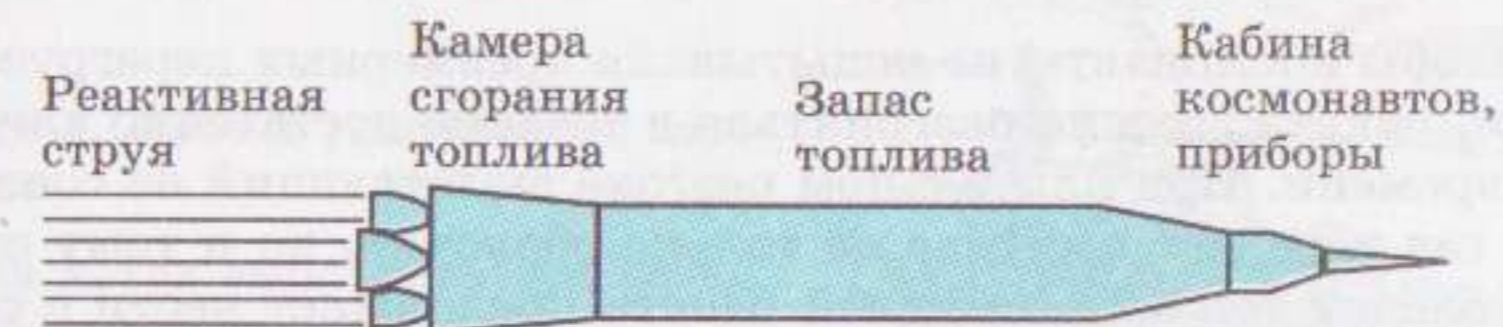


Рис. 17.3. Устройство ракеты

В головной части ракеты расположена кабина космонавтов и приборы. В начале полета на эту часть приходится всего *несколько процентов* от общей массы ракеты.

Основную массу ракеты в начале полета составляет запас топлива. В камере сгорания топливо превращается в газ при очень высокой температуре и огромном давлении. Через реактивные сопла продукты сгорания топлива выбрасываются назад.

КАК СВЯЗАНЫ СКОРОСТЬ РАКЕТЫ И СКОРОСТЬ ВЫБРАСЫВАЕМОГО РАКЕТОЙ ГАЗА?

При расчете реактивного движения используют закон сохранения импульса.

Предположим сначала, что ракета сразу выбрасывает весь запас топлива в виде газа (в действительности так не происходит; см. ниже раздел «Для чего ракеты делают многоступенчатыми?»). Обозначим массу оболочки ракеты (то есть без запаса топлива) $m_{об}$, массу газа — m_r , а скорости оболочки и газа после выбрасывания топлива — $\vec{v}_{об}$ и \vec{v}_r . Согласно закону сохранения импульса $m_{об}\vec{v}_{об} + m_r\vec{v}_r = 0$, откуда получаем $v_{об} = v_r \frac{m_r}{m_{об}}$. Таким обра-

зом, чем больше скорость выброшенного газа и чем больше его масса, тем больше скорость оболочки.

В современных ракетах скорость вылетающего газа достигает нескольких километров в секунду (в несколько раз больше скорости пули). Как следует из соотношения $v_{об} = v_r \frac{m_r}{m_{об}}$, для того чтобы даже при такой скорости вылетающего газа оболочка ракеты приобрела первую космическую скорость (около 8 км/с), необходимо, чтобы масса топлива в несколько раз превышала массу оболочки. Но и это было бы только в том случае, если бы весь газ из ракеты вылетал сразу — как ядро из пушки. Однако при этом ускорение ракеты было бы настолько большим, что возникающую перегрузку не смогли бы выдержать не только космонавты, но и приборы (см. § 13. *Вес и невесомость*).

ДЛЯ ЧЕГО РАКЕТЫ ДЕЛАЮТ МНОГОСТУПЕНЧАТЫМИ?

Чтобы космонавты не испытывали чрезмерных перегрузок на старте, ракета должна разогнаться в течение достаточно длительного времени. При длительном разгоне вылетающий из сопла ракеты газ передает импульс не только оболочке, но и тому огромному запасу топлива, который ракета продолжает нести с собой. В результате расход топлива многократно увеличивается. Согласно расчетам, чтобы разогнать ракету до первой космической скорости, масса топлива должна в десятки раз превышать массу полезного груза. Поэтому ракету делают *многоступенчатой*.

Первая и вторая ступени ракеты представляют собой космические баки с горючим — это емкости с топливом, камерами сго-

рания и соплами. Когда топливо первой ступени сгорает, она отделяется от ракеты и масса ракеты значительно уменьшается. Затем то же происходит со второй ступенью, после чего включаются двигатели третьей ступени, завершающие разгон ракеты до расчетной скорости.

ГДЕ ЕЩЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ?

Реактивные двигатели ставят на самолеты — военные и пассажирские. Все рекорды скорости установлены сегодня именно на реактивных самолетах.

Реактивные двигатели ставят также на гоночные автомобили, скорость которых достигает тысячи километров в час.

2. РАЗВИТИЕ РАКЕТОСТРОЕНИЯ И ОСВОЕНИЕ КОСМОСА

ОТ ГЕРОНА ДО НЬЮТОНА

Реактивное движение впервые использовал древнегреческий ученый Герон на рубеже старой и новой эры. Небольшой наполненный водой металлический сосуд в форме птицы подвешивался над огнем. Когда вода закипала, струя пара выбрасывалась назад, толкая «птицу» вперед. Это устройство не нашло практического применения и служило только забавой.

Принцип реактивного движения был переоткрыт только тысячу лет спустя — около 960 г. в Китае. Китайцы к тому времени уже изобрели порох, и их ракеты представляли собой бамбуковые трубки, начиненные порохом. Эти ракеты не отличались точностью, зато наводили панику на людей и лошадей.

Один из первых проектов автомобиля был также с реактивным двигателем (рис. 17.4) и принадлежал этот проект самому Ньютону.

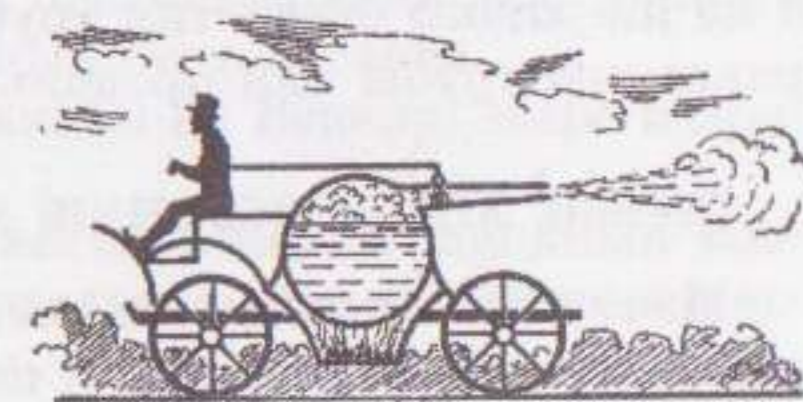


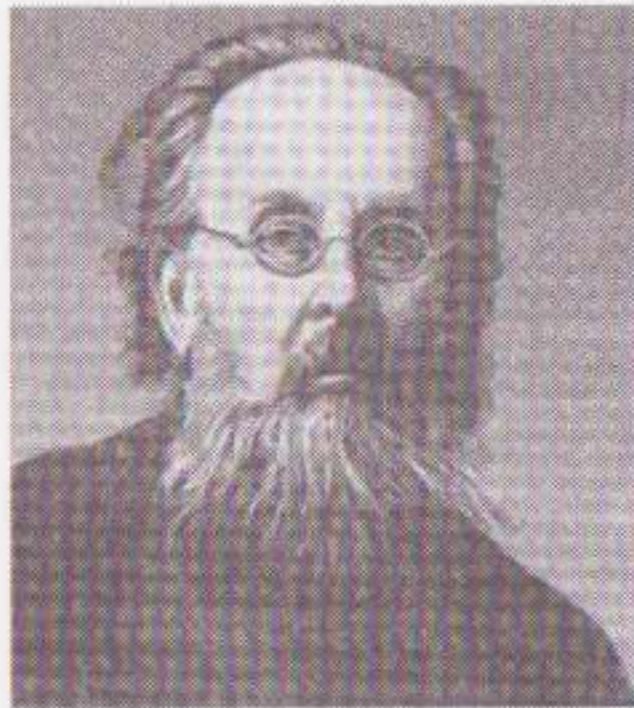
Рис. 17.4. Проект реактивного автомобиля

Пар из котла выбрасывается назад, толкая автомобиль вперед.

КОНСТАНТИН ЭДУАРДОВИЧ ЦИОЛКОВСКИЙ

Мысль о том, что ракеты можно использовать для освоения космоса, первым высказал учитель одной из калужских гимназий Константин Эдуардович Циолковский.

Опередив свое время больше чем на полвека, Циолковский заложил основы теории реактивного движения и ракетных двигателей, предложил использовать многоступенчатые ракеты, разработал принципы систем жизнеобеспечения экипажа.



Циолковскому принадлежит знаменитое изречение: «Земля — колыбель разума, но нельзя вечно жить в колыбели».

К. Э. Циолковский (1857—1935)

Вот как образно описывал ракету сам Циолковский. «Снаряд имеет снаружи вид бескрылой птицы, легко рассекающей воздух. Большая часть внутренности снаряда занята двумя веществами в жидком состоянии: водородом и кислородом¹. Обе жидкости разделены перегородкой и соединяются между собою только мало-помалу. Остальная часть камеры, меньшей вместимости, назначена для помещения наблюдателя и разного рода аппаратов, необходимых для сохранения его жизни, для научных наблюдений и для управления «ракетой» (так называли мы наш реактивный прибор)².

Водород и кислород, смешиваясь в узкой части постепенно расширяющейся трубы, вроде духового музыкального инструмента, соединяются химически и образуют водяной пар при страшно высокой температуре. Он имеет огромную упругость и вырывается из широкого отверстия трубы с ужасающей скоростью по направлению трубы или продольной оси камеры».

ПЕРВЫЕ ЭТАПЫ ОСВОЕНИЯ КОСМОСА

Мечту Циолковского о космических полетах первыми осуществили его соотечественники под руководством Сергея Павловича Королева.

¹ Циолковский полагал, что ракетным топливом будут водород и кислород, образующие при смешении взрывчатый «гремучий газ». Впоследствии были найдены более эффективные виды топлива для ракет.

² Как видите, даже слово «ракета» для названия космических кораблей впервые было предложено Циолковским!

Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 года. Первым космонавтом Земли стал Юрий Алексеевич Гагарин. Его космический полет состоялся 12 апреля 1961 года.



С. П. Королев (1907—1966)



Ю. А. Гагарин (1934—1968)

В 1969 г. человек впервые ступил на Луну. Первыми людьми, побывавшими на Луне, были американские космонавты Н. Армстронг и Э. Олдрин.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Со времени первых космических полетов ракеты были значительно усовершенствованы, и сегодня на околоземные орбиты с их помощью выводятся большие космические станции, на которых постоянно работают космонавты.

Ракетами выведены на орбиты сотни спутников связи, которые обеспечивают передачи тысяч телевизионных программ и миллионов телефонных разговоров, благодаря чему вся планета окутана сегодня «паутиной» надежных систем связи.

Запущены исследовательские ракеты на Венеру, Марс и другие планеты Солнечной системы.

Россия принимает активное участие в международных космических проектах, в частности, используя международные космические станции «Салют» и «Мир».

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Движение, при котором тело изменяет свою скорость, отбрасывая свою часть, называют **реактивным движением**. Примером реактивного движения является движение ракеты.

- Использовать ракеты для освоения космоса предложил российский ученый **К. Э. Циолковский**, который заложил основы теории ракетного движения.
- Запуск первого искусственного спутника Земли и первый полет человека в космос были осуществлены в Советском Союзе.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое реактивное движение?
2. Приведите примеры реактивного движения.
3. Поставьте простой, но эффектный опыт: сильно надуйте воздушный шарик и отпустите его, не закрывая отверстия. Объясните движение шарика.
4. В чем состоит принцип действия ракеты?
5. Как устроена ракета?
6. Где используется реактивное движение?
7. Кто первым предложил использовать ракеты для полета в космос?
8. Где и когда был запущен первый искусственный спутник Земли? Кто был руководителем этой космической программы? Кто стал первым космонавтом?
9. Чем отличается ракета от пушки и что у них общего?
- 10*. Французский писатель Жюль Верн написал в 19-м веке роман «Из пушки на Луну», в котором рассказывает, как путешественники полетели на Луну в снаряде, выпущенном из огромной пушки. Какие недостатки вы видите в этом проекте космического путешествия? Как преодолели их в современных проектах?
- 11*. Для чего ракеты делают многоступенчатыми?
- 12*. Как ракета может уменьшить свою скорость в открытом космосе?
- 13*. Космонавт вышел в открытый космос и стал фотографировать Землю. В это время трос, связывавший его с кораблем, оборвался. Но космонавт не растерялся и смог вернуться на корабль. Что он мог для этого сделать?

§ 18. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ

1. Механическая работа
2. Мощность

В этом параграфе мы введем понятия механической работы и мощности.

Рассмотрим работы силы тяжести, силы упругости и силы трения.

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ЗОЛОТОЕ ПРАВИЛО МЕХАНИКИ» И МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

Еще в Древнем Египте и Древней Греции люди научились значительно увеличивать приложенную силу с помощью простых механизмов — таких как рычаг или наклонная плоскость¹. Вера во всемогущество рычага была столь велика, что древнегреческий ученый Архимед заявил: «Дайте мне точку опоры, и я сдвину Землю!»

Однако уже тогда было замечено, что, прикладывая меньшую силу, приходится всегда совершать большее перемещение. Например, действуя на длинное плечо рычага небольшой силой, можно поднять коротким плечом рычага тяжелый груз, но длинный конец рычага совершит при этом большее перемещение, чем короткий.

Так была обнаружена закономерность — настолько важная, что ее даже называли «золотым правилом механики»:

во сколько раз мы выигрываем в силе, во столько же раз проигрываем в перемещении.

Из «золотого правила механики» следует, что, каким бы простым механизмом мы ни пользовались,

произведение силы на перемещение остается одним и тем же (если не учитывать трения).

Это произведение назвали *механической работой* (для краткости мы будем называть ее просто работой). Работа является скалярной величиной и обозначается обычно буквой A .

Единицей работы в системе СИ является *джоуль* (Дж). Один джоуль — это работа, которая совершается силой в 1 Н при пере-

¹ Например, благодаря использованию рычагов, наклонных плоскостей и блоков древние египтяне смогли построить свои знаменитые пирамиды, размеры которых поражают воображение и сегодня.

мещении тела на 1 м в направлении действия силы. Таким образом, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$.

РАБОТА ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ

Сила направлена вдоль перемещения

Из курса физики основной школы вы уже знаете, что если направление силы \vec{F} совпадает с направлением перемещения \vec{s} , то работа силы $A = Fs$. Если же сила направлена противоположно перемещению, то $A = -Fs$. Таким образом, работа силы может быть как *положительной*, так и *отрицательной*.

Пример

Когда человек поднимает груз, работа приложенной им к грузу силы положительна (направление силы совпадает с направлением перемещения), а работа приложенной к тому же грузу силы тяжести отрицательна (сила направлена противоположно перемещению).

Если перемещение равно нулю, то работа силы равна нулю.

Пример

Когда человек держит груз на одной и той же высоте, он не совершает механическую работы: человека в этом случае можно заменить подставкой.

Держа груз на весу, человек устает не из-за того, что он совершает работу, а из-за постоянного напряжения мышц. Если он будет держать тот же груз на коленях, то устанет намного меньше, потому что нагрузка будет приходиться не на мышцы, а на кости.

Сила направлена перпендикулярно перемещению

Если сила направлена перпендикулярно перемещению, работа силы равна нулю.

Примеры

1. Сила тяжести не совершает работы при перемещении тела по горизонтальной плоскости.
2. Сила нормальной реакции не совершает работы при перемещении тела вдоль поверхности.
3. Не совершает работы сила натяжения веревки, удерживающая груз при его вращении, — эта сила направлена перпендикулярно скорости (а тем самым — и перемещению за каждый малый промежуток времени).
4. Не совершает работы сила тяготения, действующая на планету или искусственный спутник при движении по круговой орбите.

Сила, направленная под углом к перемещению

Если сила \vec{F} направлена под углом α к перемещению тела, ее можно разложить на две составляющие \vec{F}_1 и \vec{F}_2 так, что \vec{F}_1 направ-

лена вдоль перемещения, а \vec{F}_2 — перпендикулярно перемещению (рис. 18.1).

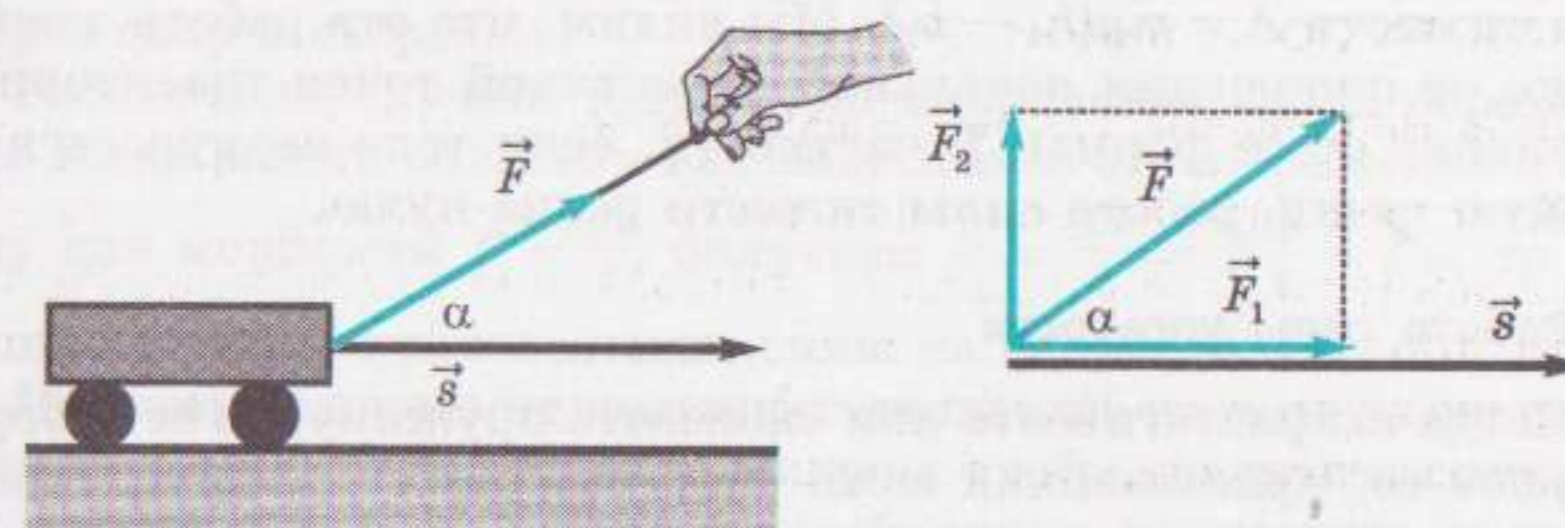


Рис. 18.1. Разложение силы, направленной под углом к перемещению, на две составляющие

Работу совершает только составляющая силы \vec{F}_1 , направленная вдоль перемещения. Так как проекция силы \vec{F}_1 на направление перемещения равна $F \cos \alpha$, то

работа постоянной силы $A = Fs \cos \alpha$, где α — угол между направлением силы и направлением перемещения.

Поскольку $\cos \alpha > 0$ при $0 \leq \alpha < 90^\circ$ и $\cos \alpha < 0$ при $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, из формулы $A = Fs \cos \alpha$ следует, что работа силы положительна, если направление силы совпадает или составляет острый угол с направлением перемещения, и отрицательна, если сила направлена противоположно перемещению или направление силы составляет тупой угол с направлением перемещения.

Формула $A = Fs \cos \alpha$ применима и в случае, когда сила направлена перпендикулярно перемещению: в этом случае $\alpha = 90^\circ$, а поскольку $\cos 90^\circ = 0$, то $A = 0$.

РАБОТА СИЛ ТЯЖЕСТИ, УПРУГОСТИ И ТРЕНИЯ

Работа силы тяжести

При подъеме тела массой m на высоту h сила тяжести совершает отрицательную работу $A = -mgh$, так как при этом сила тяжести направлена противоположно перемещению. Зато при движении тела вниз сила тяжести совершает положительную работу $A = mgh$, так как направление силы тяжести совпадает с направлением перемещения.

Если тело движется по произвольной траектории, его движение можно представить как «ступенчатое», то есть состоящее из небольших горизонтальных и вертикальных участков.

Суммарная работа силы тяжести на всех горизонтальных участках равна нулю, а алгебраическая (с учетом знака) сумма

работ на всех вертикальных участках равна $mg(h_1 - h_2)$, где h_1 — начальная высота тела, h_2 — его конечная высота.

Таким образом, при движении по любой траектории работа силы тяжести $A = mg(h_1 - h_2)$. Мы видим, что эта работа зависит только от положения начальной и конечной точек траектории и не зависит от ее формы. В частности, если тело вернулось в начальную точку, работа силы тяжести равна нулю.

Работа силы упругости

Когда вы растягиваете или сжимаете пружину, то есть *деформируете* ее, приложенная вами сила совершает положительную работу, так как направление силы совпадает с направлением перемещения. Действующая же со стороны пружины сила упругости совершает при этом отрицательную работу, потому что эта сила направлена противоположно перемещению.

Зато при распрямлении пружины, то есть возвращении ее в недеформированное состояние, сила упругости совершает *положительную* работу, так как направление силы упругости совпадает при этом с направлением перемещения. Эта работа равна той работе, которую мы совершили, деформируя пружину.

Работа силы трения скольжения

Сила трения скольжения направлена всегда противоположно перемещению¹, и поэтому работа этой силы всегда отрицательна.

Этим сила трения скольжения существенно отличается от силы тяжести и силы упругости, работа которых, как мы видели, может быть и положительной, и отрицательной.

2. МОЩНОСТЬ

Часто важна не только совершаемая работа, но и скорость совершения работы, которая характеризуется мощностью.

Мощностью P называют отношение совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Единицей мощности в системе СИ является *джоуль в секунду* (Дж/с), или *ватт* (Вт), названная так в честь английского изобретателя Уатта. 1 Вт — это такая мощность, при которой работа в 1 Дж совершается за 1 с. Таким образом, 1 Вт = 1 Дж/с.

¹ В системе отсчета, связанной с телом, относительно которого перемещается данное тело.

КАК ВЫРАЖАЕТСЯ МОЩНОСТЬ ЧЕРЕЗ СИЛУ И СКОРОСТЬ?

Часто мощность удобно выражать не через работу и время, а через *силу и скорость*.

Рассмотрим случай, когда сила направлена вдоль перемещения. Тогда работа силы $A = Fs$. Подставляя это выражение в формулу для мощности $P = \frac{A}{t}$, получаем $P = \frac{Fs}{t} = F \frac{s}{t} = Fv$, то есть мощность равна произведению силы на скорость.

Поэтому водитель переключает двигатель на первую скорость, когда автомобиль едет вверх по склону: чтобы увеличить силу тяги при той же *мощности* мотора, необходимо уменьшить скорость движения.

МОЩНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА И СОЗДАННЫХ ИМ ДВИГАТЕЛЕЙ

Схема (рис. 18.2) иллюстрирует, насколько «мощь человеческого разума» больше мощности человеческих мускулов.

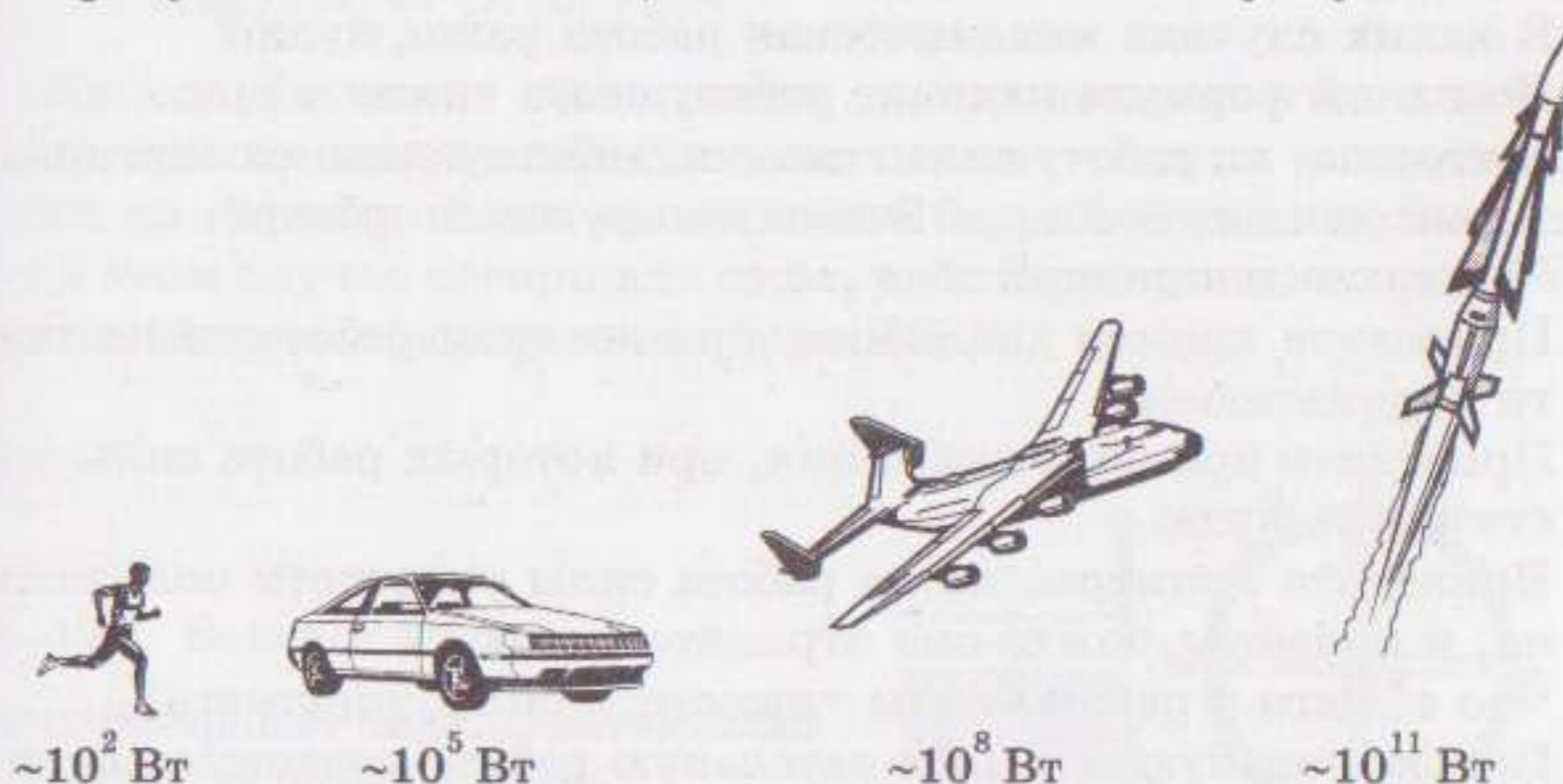


Рис. 18.2. Сравнение мощности человека и созданных им двигателей

Из приведенной схемы видно, что:

- мощность легкового автомобиля примерно в *тысячу* раз больше средней мощности человека;
- мощность авиалайнера примерно в *тысячу* раз больше мощности автомобиля;
- мощность космической ракеты примерно в *тысячу* раз больше мощности самолета.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Работа постоянной силы $A = Fs \cos \alpha$, где α — угол между направлением силы и направлением перемещения.
- Работа силы тяжести $A = mg(h_1 - h_2)$.

- **Мощностью P** называют отношение совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{t}. \text{ Мощность можно выразить через силу и скорость:}$$

$$P = Fv.$$



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое механическая работа?
2. Какова единица работы?
3. Камень падает вниз. Какой знак при этом имеет работа силы тяжести, действующей на камень?
4. От чего зависит работа постоянной силы, направленной вдоль линии перемещения и под углом к перемещению?
5. В каких случаях механическая работа равна нулю?
6. По какой формуле находят работу силы тяжести?
7. Совершает ли работу сила тяжести, действующая на спутник, который движется вокруг Земли по круговой орбите?
8. Что такое мощность?
- 9*. Приведите пример движения, при котором работа силы тяжести отрицательна.
- 10*. Приведите примеры движения, при которых работа силы тяжести равна нулю.
- 11*. Приведите примеры, когда работа силы упругости положительна, и примеры, когда она отрицательна.
- 12*. Что общего у работы силы тяжести и силы упругости?
- 13*. Положительную или отрицательную работу совершает сила тяжести, действующая на тело, когда оно скользит вниз по наклонной плоскости?
- 14*. Ученик массой 50 кг взбежал за 3 мин на 5-й этаж. Оцените развиваемую учеником мощность. Высоту одного этажа примите равной 3 м.
- 15*. Как выражается мощность через силу и скорость?
- 16*. Почему водитель на крутом подъеме переходит на первую скорость?

§ 19. ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1. Работа и энергия
2. Механическая энергия
3. Закон сохранения энергии

Энергия является общей количественной мерой движения и взаимодействия тел.

В этом параграфе мы рассмотрим связь между работой и энергией, механическую энергию тела и системы тел.

Мы расскажем также о законе сохранения механической энергии и приведем примеры, иллюстрирующие проявление этого закона.

1. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Несколько веков назад люди догадались, что механическую работу можно «перекладывать на плечи» машин и механизмов. Одним из первых таких механизмов была водяная мельница: работу в этом случае совершала сила, действующая со стороны воды, падающей на лопасти колеса (рис. 19.1).

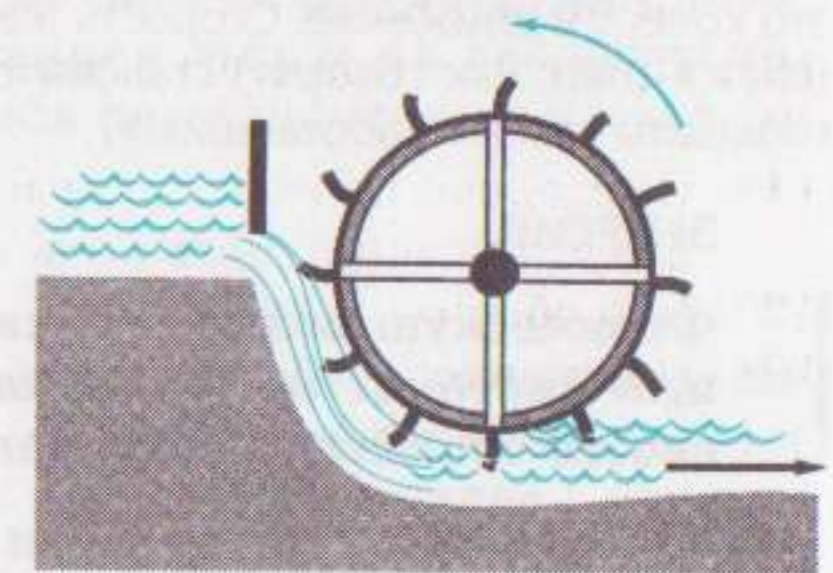


Рис. 19.1. Водяное колесо

Работу совершает сила, действующая со стороны падающей воды.

Чтобы такая мельница работала, надо было создать искусственный «водопад», то есть разность уровней воды. Для этого строилась запруда на небольшой реке или ручье.

Современная гидроэлектростанция, которая заставляет «работать» огромную реку, «выросла» из маленькой водяной мельницы на ручье.

В КАКОМ СЛУЧАЕ ТЕЛО ИЛИ СИСТЕМА ТЕЛ МОЖЕТ СОВЕРШИТЬ РАБОТУ?

До сих пор мы говорили о работе *силы*. Далее речь пойдет о работе, совершаемой *телом* или *системой тел*: под этим мы

будем подразумевать работу, которую совершают силы, действующие со стороны данного тела (системы тел) на другие тела.

Примеры

1. Опускающийся груз производит положительную работу, действуя своим весом на опору или подвес: при этом он может, скажем, раскручивать колесо или поднимать другой груз. Следовательно, *поднятый груз обладает способностью совершать работу*. Если груз движется с постоянной скоростью, его вес равен действующей на него силе тяжести (см. § 13. *Вес и невесомость*), так что при равномерном движении груза вниз работа, совершаемая весом тела, равна работе приложенной к грузу силы тяжести. Поэтому в дальнейшем, говоря о подъеме или опускании груза, мы будем говорить о работе силы тяжести.

2. Распрямляющаяся пружина совершает положительную работу, действуя силой упругости на другое тело, — скажем, приводя в движение какой-либо механизм (как в заводных часах или заводной игрушке). Следовательно, *деформированная пружина обладает способностью совершать работу*.

3. Если скорость тела уменьшается, значит, другие тела его «тормозят», то есть действуют на него с силой, направленной противоположно его перемещению. При этом согласно третьему закону Ньютона со стороны этого тела действует сила, направленная в сторону перемещения тела, — и эта сила совершает положительную работу. Следовательно, *движущееся тело обладает способностью совершать работу*. Например, движущаяся с большой скоростью струя пара, ударяя в лопасти колеса паровой турбины, приводит это колесо в движение. Скорость же струи пара при этом значительно уменьшается (пар, как говорят, становится «отработанным», хотя точнее было бы называть его «отработавшим»).

ЭНЕРГИЯ

Физическую величину, характеризующую способность тела или системы тел совершать работу вследствие изменения своего состояния, называют энергией.

Мерой изменения энергии является совершаемая работа.

Если тело (система тел) совершает положительную работу, то энергия тела (системы тел) уменьшается на величину, равную совершенной работе. Если же тело (система тел) совершает отрицательную работу, то энергия тела (системы тел) увеличивается. В последнем случае часто говорят, что работа совершается *над* телом (системой тел).

Таким образом,

изменение ΔE энергии тела (системы тел) связано с совершаемой этим телом (системой тел) работой A соотношением $\Delta E = -A$.

Энергия измеряется в тех же единицах, что и работа: *единицей энергии* в системе СИ является *джоуль*. Если тело (система тел)

совершает положительную работу в 1 Дж, энергия тела (системы тел) уменьшается на 1 Дж.

Примеры

1. Когда груз движется вниз, сила тяжести производит положительную работу — следовательно, энергия груза уменьшается. А когда груз поднимают, работу совершают над грузом — следовательно, энергия груза увеличивается.

2. Когда пружина распрямляется, сила упругости, действующая со стороны пружины, совершает положительную работу — следовательно, энергия пружины уменьшается. А когда пружину деформируют (сжимая или растягивая), работу совершают над пружиной — следовательно, энергия пружины увеличивается.

3. Когда скорость тела уменьшается, сила, действующая со стороны этого тела на другие тела, совершает положительную работу — следовательно, энергия тела уменьшается. А когда тело разгоняют, работу совершают над телом — следовательно, энергия тела увеличивается.

2. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Сегодня известно несколько видов энергии: механическая, внутренняя, химическая, атомная, электромагнитная.

Для каждого вида энергии определено, как зависит энергия от физических величин, характеризующих тело или систему тел.

Мы будем изучать в этой главе *механическую* энергию, которая определяется *взаимным положением тел и их скоростями*. Механическая энергия включает в себя *потенциальную и кинетическую* энергию.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Тело или система тел может совершать работу вследствие *изменения взаимного положения тел*. Работу при этом совершают силы, *действующие между телами или частями тела*.

Примеры

1. При движении груза вниз работу совершает сила притяжения груза к Земле.

2. При распрямлении пружины работу совершает сила упругости, обусловленная взаимодействием между атомами или молекулами вещества, из которого сделана пружина (см. § 8. *Силы в механике. Сила упругости*).

Часть механической энергии, которая определяется взаимодействием тел, называют потенциальной энергией.

Будем обозначать потенциальную энергию $E_{\text{п}}$.

Понятие потенциальной энергии применимо только к *системе взаимодействующих тел*. Когда для краткости говорят о «*потенциальной энергии тела*», всегда подразумевают одно из тел

системы взаимодействующих тел либо рассматривают само это тело как систему таких тел. Например, потенциальная энергия поднятого груза — это потенциальная энергия системы взаимодействующих тел «груз + Земля», а потенциальная энергия деформированной пружины — это потенциальная энергия взаимодействия атомов металла.

Если вследствие изменения взаимного положения тел система тел совершает работу A , то согласно общей формуле, связывающей изменение энергии с совершенной работой, изменение потенциальной энергии $\Delta E_{\text{п}} = -A$.

Нулевой уровень потенциальной энергии

Работа, совершенная системой взаимодействующих тел при изменении их взаимного положения, определяет только *изменение* потенциальной энергии. Поэтому состояние системы, при котором ее потенциальная энергия принимается равной нулю, можно выбирать произвольно. Этому состоянию сопоставляют *нулевой уровень потенциальной энергии*. Обычно выбор нулевого уровня потенциальной энергии при решении той или иной задачи обусловлен упрощением расчетов. Ведь независимо от того, какому состоянию системы сопоставлен нулевой уровень потенциальной энергии, *изменение* потенциальной энергии тела в любом конкретном опыте будет одним и тем же.

Пример

Потенциальная энергия поднятого груза

При подъеме груза массой m на высоту h над поверхностью Земли сила тяжести совершает *отрицательную* работу, равную $-mgh$, поэтому потенциальная энергия системы «груз + Земля» *увеличивается* на mgh . Удобно считать потенциальную энергию этой системы равной нулю, когда груз находится на поверхности Земли: тогда потенциальную энергию системы «груз + Земля» можно записать в виде $E_{\text{п}} = mgh$. Это выражение называют часто *потенциальной энергией поднятого груза*.

Если низшим возможным положением груза является поверхность пола, то этому положению и удобно сопоставить нулевой уровень потенциальной энергии груза. А если мы ставим опыты над столом, то нулевой уровень потенциальной энергии груза удобнее сопоставить состоянию, когда груз находится на поверхности стола.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Мы уже видели, что движущееся тело обладает способностью совершать работу.

Часть механической энергии, которая определяется движением тела, называют кинетической энергией.

Будем обозначать кинетическую энергию $E_{\text{к}}$.

Если вследствие изменения своей скорости тело совершило работу A , то согласно общей формуле, связывающей изменение энергии с совершенной работой, изменение кинетической энергии $\Delta E_{\text{к}} = -A$.

Нулевой уровень кинетической энергии (в отличие от нулевого уровня потенциальной энергии) определяется однозначно: он соответствует скорости тела, равной нулю.

Докажем, что

кинетическая энергия тела $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$, где m — масса тела, v — его скорость.

Кинетическая энергия $E_{\text{к}}$ тела массой m , движущегося со скоростью v , равна работе A , совершаемой при разгоне первоначально покоившегося тела до этой скорости.

Если к телу приложена постоянная сила \vec{F} и тело прошло путь s , то работа силы $A = Fs$. Согласно второму закону Ньютона $F = ma$, где a — ускорение тела. При движении без начальной скорости $s = \frac{at^2}{2}$, $v = at$, откуда следует, что $s = \frac{v^2}{2a}$. Поэтому

$$E_{\text{к}} = A = Fs = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}.$$

Доказательство завершено.

3. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

ОБЩИЙ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В огромном числе опытов было установлено, что для замкнутой системы тел

сумма различных видов энергий всегда остается неизменной.

Таким образом, энергия не возникает и не исчезает, а может только *превращаться* из одного вида в другой. В этом проявляется *закон сохранения энергии* — один из важнейших законов природы, поскольку он связывает воедино все процессы, происходящие в природе. Мы еще вернемся к общему закону сохранения энергии при изучении тепловых явлений (см. § 31. *Внутренняя энергия. Первый закон термодинамики*).

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Механическая энергия тела или системы тел может переходить в другие виды энергии: например, вследствие трения меха-

ническая энергия переходит во внутреннюю энергию — скорости тел уменьшаются, а тела нагреваются.

Однако существует много практически важных случаев, когда трением можно пренебречь. В этих случаях выполняется

закон сохранения механической энергии: если между телами замкнутой системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия системы сохраняется: $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \text{const}$.

Примеры решения задач с использованием закона сохранения энергии приведены в § 20. Примеры решения задач на законы сохранения.

ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Свободное падение тела

Пусть груз массой m падает без начальной скорости с высоты H (рис. 19.2).

Докажем, что при падении груза сумма его потенциальной и кинетической энергий остается постоянной.

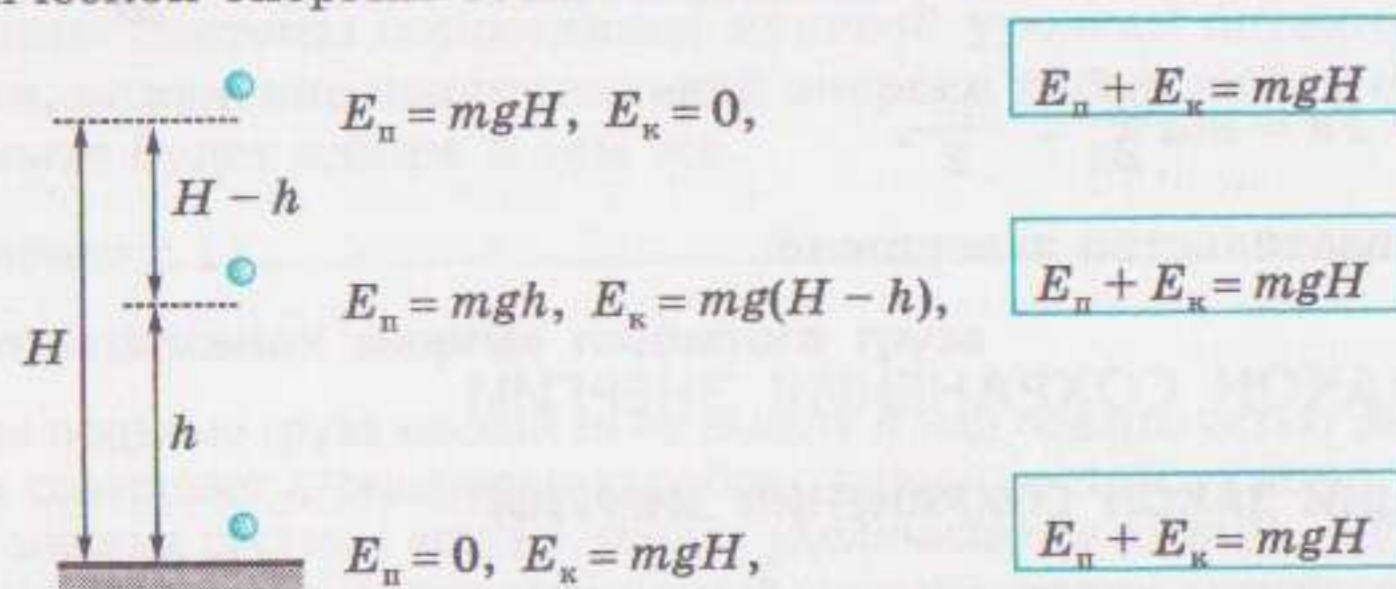


Рис. 19.2. Проявление закона сохранения энергии при свободном падении тела

В начальном состоянии потенциальная энергия груза $E_{\text{п}} = mgH$, а его кинетическая энергия $E_{\text{к}} = 0$. Таким образом, начальная механическая энергия груза $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = mgH$.

На некоторой высоте $h < H$ потенциальная энергия груза $E_{\text{п}} = mgh$. Чтобы найти кинетическую энергию груза $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ на высоте h , то есть когда он совершил перемещение $s = H - h$, воспользуемся тем, что при свободном падении без начальной скорости $s = \frac{gt^2}{2}$, $v = gt$, откуда $v^2 = 2gs$.

Следовательно, получаем $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot 2gs = mgs = mg(H - h)$.

Итак, полная механическая энергия груза на любой высоте $h < H$ равна $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = mgh + mg(H - h) = mgH$, то есть равна его начальной энергии. Доказательство завершено.

Поставим опыт

Подвесим груз на нити (рис. 19.3, а), отклоним в сторону и отпустим. Мы увидим, что, пройдя положение равновесия, груз снова поднимется на начальную высоту. Значит, энергия груза не изменилась. Можно видоизменить опыт, укрепив преграду для нити в точке С (рис. 19.3, б). Мы увидим, что и в этом случае груз снова поднимется на начальную высоту.

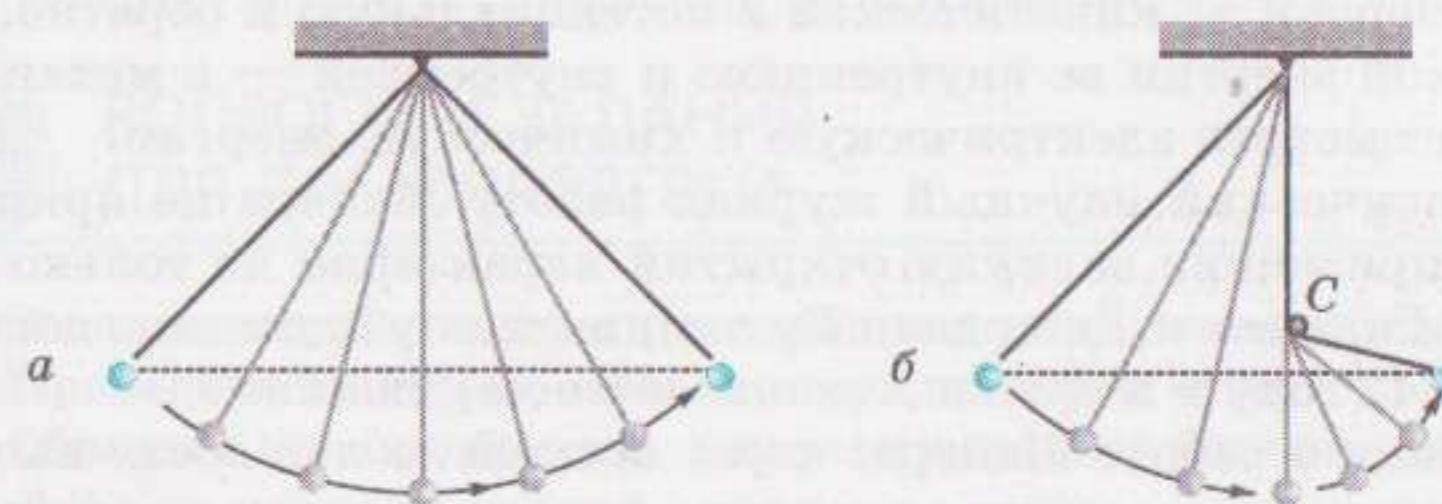


Рис. 19.3. Проявление закона сохранения энергии: пройдя положение равновесия, груз поднимается до начальной высоты

КАК И КЕМ БЫЛ ОТКРЫТ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ?

Многие физики считают закон сохранения энергии главным из всех физических законов. Он был открыт независимо друг от друга тремя учеными, причем первым среди них был не физик, а врач — немец Роберт Майер.

В 1840 году судно, на котором он работал судовым врачом, стояло у берегов тропического острова Ява. Одному из матросов от жары стало плохо. Желая ему помочь, Майер вскрывает больному вену, чтобы уменьшить избыточное кровяное давление (тогда такой прием был распространен). И, к своему ужасу, обнаруживает, что вместо темной крови потекла алая!

Испуг врача объяснялся тем, что алая кровь течет в артериях. Своим цветом она обязана высокому содержанию кислорода: это «свежая» кровь, которая только что омыла легкие. А по венам кровь течет уже после того, как она разнесла кислород по телу. В венозной крови кислорода мало, поэтому она темно-красная. Для кровопускания можно вскрывать только вену — кровотечение же из артерии смертельно опасно.

К счастью, Майер не ошибся: он вскрыл больному вену. Но он задается вопросом: почему же в вене алая кровь? Удивление Майера усиливается, когда местные врачи говорят ему, что здесь это — обычное явление: в тропиках венозная кровь у людей такая же алая, как и артериальная.

«Почему так происходит? — задумывается Майер. — Может, дело в том, что температура воздуха здесь почти равна температуре человеческого тела... Организму не нужно расходовать силу¹ на поддержание температуры тела, поэтому кислород остается в крови — ведь силу дает именно сгорание кислорода. Но это значит, что сила *сохраняется*: она только превращается из одного вида в другой, но никогда не исчезает и не появляется из ничего».

Развивая свою идею, Майер изучил все известные ему превращения энергии — кинетической в потенциальную и обратно, механической энергии во внутреннюю и внутренней — в механическую, рассмотрел электрическую и химическую энергии.

В физический научный журнал работу Майера не приняли (увы, непризнание великих открытий характерно не только для времени Галилея и Джордано Бруно), и он опубликовал свою работу в 1842 году в журнале, малоизвестном физикам.

Не зная о работе Майера, через несколько лет после выхода ее в свет закон сохранения энергии сформулировали английский физик Джеймс Джоуль и немецкий ученый Герман Гельмгольц, который дал наиболее точную его формулировку.

Почти за сто лет до Майера, Джоуля и Гельмгольца к открытию закона сохранения энергии очень близко подошел выдающийся российский ученый Михаил Васильевич Ломоносов. Но, к сожалению, труды Ломоносова долгое время оставались неизвестными европейским ученым.

Идея о взаимопревращении механической и внутренней энергии была высказана (также до Майера, Джоуля и Гельмгольца) французским ученым Карно и инженером Томпсоном, получившим известность как граф Румфорд.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Энергией** называют физическую величину, характеризующую способность тела или системы тел совершать работу вследствие изменения своего состояния.
- Мерой изменения энергии является работа: изменение ΔE энергии тела (системы тел) связано с совершаемой этим телом (системой тел) работой A соотношением $\Delta E = -A$.
- **Потенциальной энергией** называют часть механической энергии, которая определяется **взаимодействием** тел. Потенциальная энергия поднятого над землей груза $E_{\text{п}} = mgh$.

¹ В то время энергию еще называли силой!

• **Кинетической энергией** называют часть механической энергии, которая обусловлена **движением** тела. Кинетическая энергия тела $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$.

• **Закон сохранения механической энергии**: если между телами замкнутой системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия системы сохраняется: $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \text{const}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каком случае тело или система тел может совершить работу? Приведите примеры, иллюстрирующие ваш ответ.
2. Обладает ли способностью совершить работу растянутая пружина?
3. Какую физическую величину называют энергией?
4. Как связано изменение энергии тела или системы тел с совершенной работой?
5. Что такое механическая энергия? Чем она определяется? Какова единица энергии?
6. Что такое потенциальная энергия?
7. Чему равна потенциальная энергия груза, поднятого над землей?
8. Что такое кинетическая энергия? Чему равна кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v ?
9. В чем состоит закон сохранения механической энергии? При каких условиях он выполняется?
10. Система тел совершила работу, равную 100 Дж. Как изменилась энергия этой системы тел?
- 11*. Чем определяется выбор нулевого уровня потенциальной энергии?
- 12*. Как изменяется потенциальная энергия системы «груз + Земля» при движении груза вверх? вниз? по горизонтали?
- 13*. Как изменяется потенциальная энергия пружины: а) когда ее растягивают; б) когда ее сжимают; в) когда она возвращается в недеформированное состояние?
- 14*. Брусок соскальзывает с наклонной плоскости, при этом его скорость уменьшается. Как изменяется кинетическая энергия бруска? Потенциальная энергия? Механическая энергия?
- 15*. Изменяется ли потенциальная энергия лодки, плывущей по течению реки?
- 16*. Изменяется ли механическая энергия падающего камня? При ответе учтите сопротивление воздуха?

§ 20. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

1. Столкновения
2. Неравномерное движение по окружности

1. СТОЛКНОВЕНИЯ

Задача 1. НЕУПРУГИЙ УДАР

Летящая горизонтально пуля попадает в лежащий на гладком столе деревянный брусок и застревает в нем (рис. 20.1). С какой скоростью будет двигаться брусок с пулей, если масса пули $m = 10$ г, масса бруска $M = 100$ г, скорость пули $v = 110$ м/с? Какая часть механической энергии перешла во внутреннюю энергию?

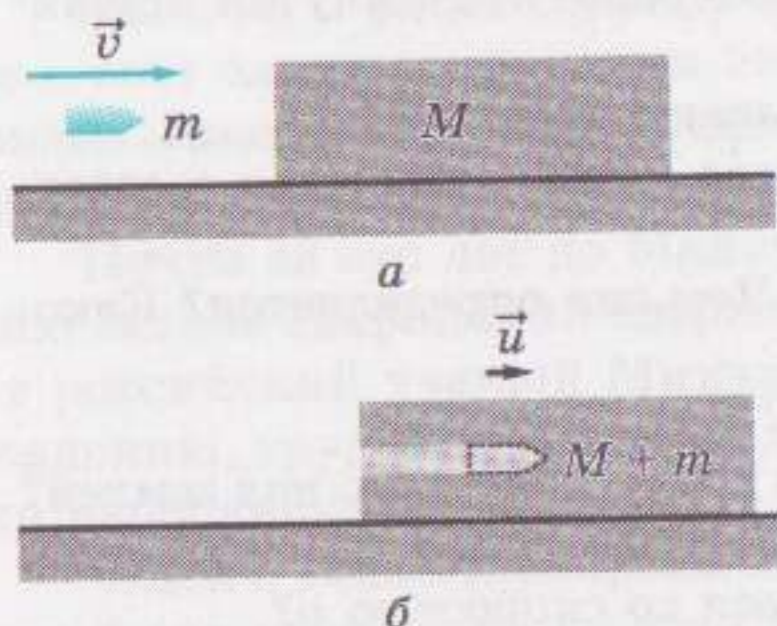


Рис. 20.1. Неупругий удар. После столкновения тел они движутся как единое целое: а — до столкновения; б — после столкновения

Решение

Описанное в условии задачи столкновение, после которого тела движутся как единое целое, называют *неупругим ударом*¹. При неупругом ударе импульс сохраняется, а механическая энергия — нет: часть ее переходит во внутреннюю энергию (тел в результате столкновения нагреваются).

В том, что при неупругом ударе механическая энергия не сохраняется, проще всего убедиться, если рассмотреть столкновение в системе отсчета, связанной с тем «единым телом», которым стали тела после столкновения. В этой системе отсчета тел до столкновения двигались, то есть их суммарная кинетическая энергия была больше нуля, а после столкновения они стали единым покоящимся телом, кинетическая энергия которого равна нулю.

Задачу о неупругом ударе легко решить в общем виде для произвольных масс и скоростей сталкивающихся тел. Обозначим

¹ Более точно — абсолютно неупругим.

массы сталкивающихся тел m_1 и m_2 , а их скорости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . После столкновения тела будут двигаться как одно тело с массой $m_1 + m_2$. Если обозначить скорость этого тела \vec{u} , то согласно закону сохранения импульса $(m_1 + m_2)\vec{u} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$.

$$\text{Отсюда получаем } \vec{u} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

Рассмотрим теперь конкретный случай, соответствующий данной задаче.

Направим ось x по направлению скорости пули. Проекция на эту ось скоростей пули и бруска с пулей обозначим соответственно v и u . Из закона сохранения импульса следует, что $(M + m)u = mv$.

Отсюда $u = \frac{mv}{M + m}$. Подставляя числовые данные, получаем, что скорость бруска с пулей $u = 10$ м/с.

Перейдем к вопросу о механической энергии. Потенциальная энергия тел в данном случае не изменилась, поэтому все изменение механической энергии обусловлено только изменением кинетической энергии. Суммарная начальная кинетическая энергия пули и бруска равна начальной кинетической энергии пули $\frac{mv^2}{2}$, так как брусок покоился. После столкновения кинетическая энергия бруска с застрявшей в нем пулей равна $\frac{(M + m)u^2}{2} = \frac{M + m}{2} \left(\frac{mv}{M + m}\right)^2 = \frac{m}{M + m} \frac{mv^2}{2}$.

Мы записали выражение для конечной механической энергии в таком виде, чтобы было видно, что она *меньше* начальной энергии $\frac{mv^2}{2}$ в $\frac{M + m}{m}$ раз. Подставляя числовые данные из условия задачи, получаем, что конечная механическая энергия меньше начальной в 11 раз, то есть составляет около 9% от начальной механической энергии. Следовательно, 91% механической энергии перешло во внутреннюю энергию.

Задача 2. УПРУГИЙ УДАР

Вдоль одной прямой движутся два шара с равными массами. Скорость первого шара равна 10 м/с, а скорость второго шара равна 3 м/с. Какими станут скорости шаров после *упругого столкновения*¹, то есть такого столкновения, при котором сохраняется механическая энергия?

Рассмотрите случай, когда шары движутся в одном направлении и когда они движутся навстречу друг другу.

¹ Упругое столкновение называют также упругим ударом.

Решение

При решении задач об упругих столкновениях применяют *закон сохранения импульса*, и *закон сохранения механической энергии* (напомним, что в случае неупругого удара выполняется только закон сохранения импульса).

Обозначим массу каждого из шаров m , их начальные скорости — \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , а конечные — \vec{u}_1 и \vec{u}_2 .

Из закона сохранения импульса при столкновении следует, что $m\vec{u}_1 + m\vec{u}_2 = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2$, а согласно закону сохранения энергии $\frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2}$. В проекциях на ось x , направленную вдоль линии движения шаров, уравнения законов сохранения импульса и энергии имеют вид:

$$mu_{1x} + mu_{2x} = mv_{1x} + mv_{2x},$$

$$\frac{mu_{1x}^2}{2} + \frac{mu_{2x}^2}{2} = \frac{mv_{1x}^2}{2} + \frac{mv_{2x}^2}{2}.$$

Мы получили систему двух уравнений с двумя неизвестными. Покажем, как решать системы такого вида: при их решении полезны некоторые «секреты».

Сокращая оба уравнения на m и умножая второе уравнение на 2, получаем:

$$u_{1x} + u_{2x} = v_{1x} + v_{2x},$$

$$u_{1x}^2 + u_{2x}^2 = v_{1x}^2 + v_{2x}^2.$$

Перегруппируем слагаемые в этих уравнениях так, чтобы все величины, относящиеся к первому шару, были слева от знака равенства, а относящиеся ко второму шару — справа:

$$u_{1x} - v_{1x} = v_{2x} - u_{2x}, \quad (1)$$

$$u_{1x}^2 - v_{1x}^2 = v_{2x}^2 - u_{2x}^2. \quad (2)$$

Если столкновение произошло, то скорости шаров изменились, то есть $u_{1x} \neq v_{1x}$, $u_{2x} \neq v_{2x}$. Поэтому левая и правая части первого уравнения отличны от нуля и, следовательно, второе уравнение можно разделить на первое. В результате получим $u_{1x} + v_{1x} = v_{2x} + u_{2x}$. Решая это уравнение совместно с уравнением (1), получаем $u_{1x} = v_{2x}$, $u_{2x} = v_{1x}$. Таким образом, *в результате упругого столкновения шары равной массы обмениваются скоростями*.

Следовательно, первый шар после упругого столкновения будет двигаться с той скоростью, какую имел до столкновения второй шар, то есть 3 м/с, второй же шар «получит» скорость первого шара, то есть 10 м/с. При этом не имеет значения, двигались ли шары до столкновения в одном направлении или навстречу друг другу. Если шары двигались вначале в одном направлении, столк-

новение произойдет в том случае, если «быстрый» шар движется вдогонку «медленному». На рис. 20.2 изображены соответствующие случаи.

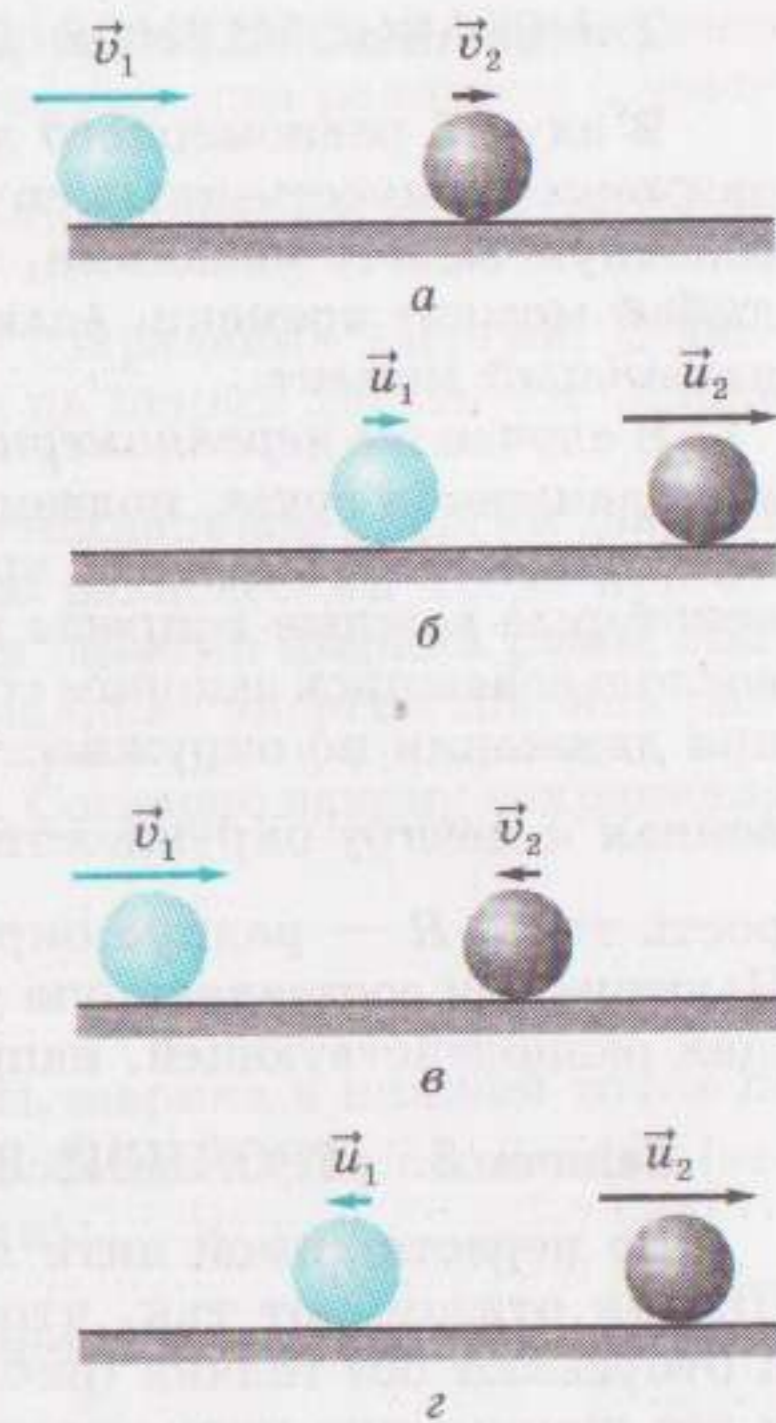


Рис. 20.2. Упругий удар двух шаров равных масс. В результате столкновения шары обмениваются скоростями: а — начальные скорости шаров до столкновения направлены в одну сторону; б — движение шаров после столкновения; в — начальные скорости шаров до столкновения направлены противоположно; г — движение шаров после столкновения

Поставим опыт

Как следует из рассмотренной задачи, если шар налетает на покоящийся шар такой же массы, он останавливается, передав второму шару свой импульс и свою кинетическую энергию.

Это можно наглядно продемонстрировать с помощью следующего опыта (рис. 20.3). Подвесим рядом два одинаковых металлических шарика на нитях равной длины. Если отвести в сторону и отпустить шарик 1, то после столкновения с шариком 2 шарик 1 остановится, а шарик 2 поднимется на ту же высоту, с какой начинал движение шарик 1. Затем, при следующем столкновении, произойдет передача импульса и энергии шарик 1 и т. д.

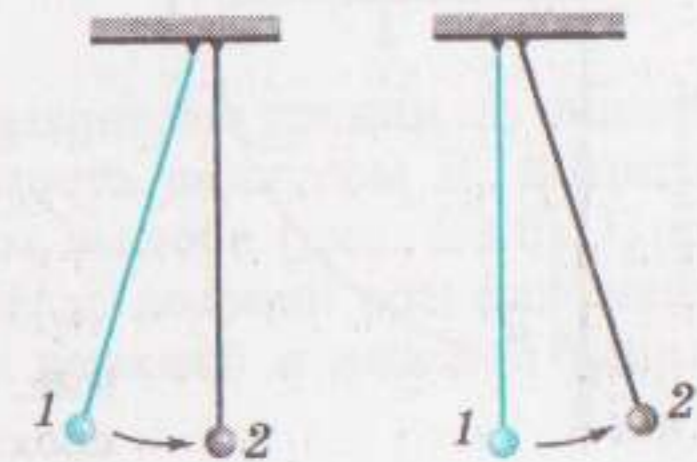


Рис. 20.3. Упругое столкновение шаров равной массы, когда один из шаров вначале покоился

В результате столкновения покоившийся шар приобретает скорость налетающего шара, а налетающий шар останавливается.

2. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

В случае равномерного движения по окружности (например, движения искусственных спутников и планет) мы смогли решить основную задачу механики, то есть определить положение тела в любой момент времени, если задано его положение и скорость в начальный момент.

В случае же *неравномерного* движения по окружности (например, движения груза, подвешенного на нити) определить положение тела в любой момент времени намного сложнее. Однако на некоторые важные вопросы можно найти ответ довольно просто, воспользовавшись законом сохранения энергии и тем фактом, что при движении по окружности составляющая ускорения, направленная к центру окружности, равна по модулю $\frac{v^2}{R}$, где v — скорость тела, R — радиус окружности. Согласно второму закону Ньютона эту составляющую ускорения сообщает телу составляющая равнодействующей, направленная к центру окружности.

Задача 3. «ТРОЙНОЙ ВЕС»

На нерастяжимой нити длиной l подвешен шарик массой m . Шарик отклоняют так, что нить становится горизонтальной, и отпускают без толчка (рис. 20.4). Каковы скорость, ускорение и вес шарика при прохождении положения равновесия?

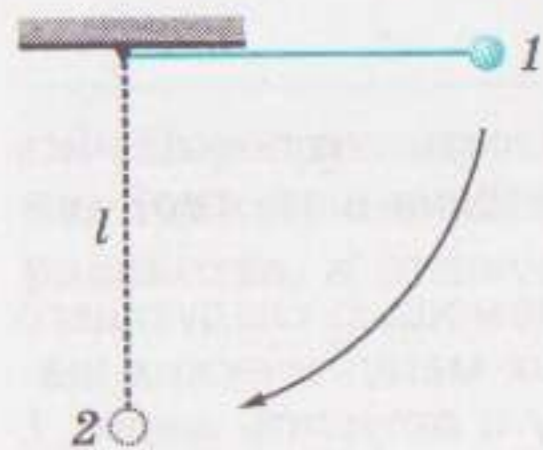


Рис. 20.4. Движение шарика, подвешенного на нити

Шарик движется из положения 1. Надо определить скорость шарика и его вес, когда шарик проходит положение равновесия 2.

Решение

На шарик действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{T} . Ускорение шарика сообщает равнодействующая этих сил (рис. 20.5).

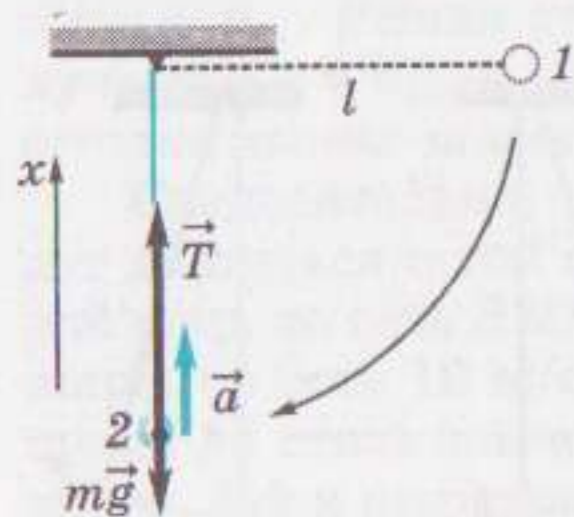


Рис. 20.5. Силы, действующие на шарик при прохождении им положения равновесия

В нижней точке траектории ускорение шарика направлено вверх. Так как шарик движется по окружности радиусом l , ускорение равно $\frac{v^2}{l}$, где v — скорость шарика в нижней точке. Эту скорость можно найти, применив закон сохранения энергии. В данном случае он выполняется, так как на шарик действуют только сила тяжести и сила упругости.

Сопоставим нулевой уровень потенциальной энергии шарика его низшему положению (положению равновесия). Тогда при отклонении нити на 90° потенциальная энергия шарика равна mgl . В нижней точке траектории потенциальная энергия шарика равна нулю, а кинетическая равна $\frac{mv^2}{2}$. Согласно закону сохранения энергии $\frac{mv^2}{2} = mgl$.

Отсюда $v = \sqrt{2gl}$, то есть скорость шарика в нижней точке по модулю такая же, как если бы он свободно падал с высоты l (это следствие закона сохранения энергии).

Ускорение шарика $a = \frac{v^2}{l}$ в нижней точке траектории направлено *вверх* (к центру окружности). Поскольку $v^2 = 2gl$, получаем, что в нижней точке траектории ускорение шарика $a = \frac{v^2}{l} = 2g$.

Это ускорение сообщает шарика равнодействующая силы натяжения нити и силы тяжести, поэтому в проекциях на направленную вверх ось x уравнение второго закона Ньютона для шарика имеет вид $T - mg = 2mg$, откуда $T = 3mg$.

Согласно третьему закону Ньютона вес шарика равен по модулю силе натяжения нити (вспомним, что вес — это сила, с которой тело растягивает подвес). Таким образом, при прохождении шариком положения равновесия его вес равен $3mg$, то есть *втрое больше* действующей на шарик силы тяжести.

Согласно третьему закону Ньютона вес шарика равен по модулю силе натяжения нити (вспомним, что вес — это сила, с которой тело растягивает подвес). Таким образом, при прохождении шариком положения равновесия его вес равен $3mg$, то есть *втрое больше* действующей на шарик силы тяжести.

Задача 4. «МЕРТВАЯ ПЕТЛЯ»

Небольшое тело массой m соскальзывает без трения по наклонному желобу, переходящему в окружность радиусом R , и проходит «мертвую петлю», не отрываясь от желоба (рис. 20.6). С какой минимальной начальной высотой H_{\min} должно соскальзывать тело? Чему равен при этом вес тела в верхней и нижней точках окружности?

Решение

Если тело не отрывается от желоба, то на тело в верхней точке траектории действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции желоба \vec{N} , обе направленные вниз (рис. 20.6).

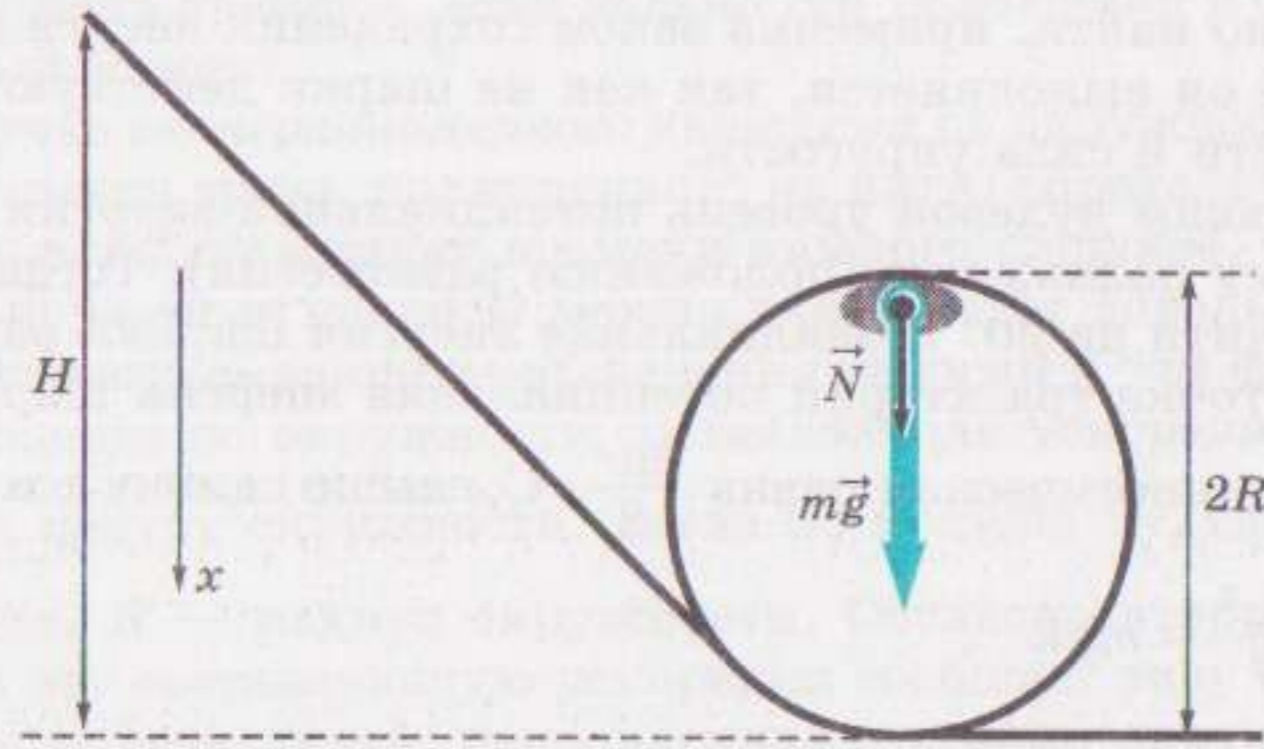


Рис. 20.6. Прохождение «мертвой петли»

Поскольку тело движется по окружности радиусом R , равнодействующая этих сил сообщает телу центростремительное ускорение $\frac{v^2}{R}$, где v — скорость тела в верхней точке траектории.

В проекциях на направленную вниз ось x уравнение второго закона Ньютона имеет вид $N + mg = \frac{mv^2}{R}$.

Чтобы найти правую часть этого уравнения, воспользуемся законом сохранения механической энергии, который в данном случае выполняется, поскольку на тело действуют только сила тяжести и сила упругости.

Сопоставим нулевой уровень потенциальной энергии положению тела в нижней точке окружности. Тогда в начальном положении потенциальная энергия тела равна mgH , а в верхней точке окружности она равна $2mgR$. Из закона сохранения механической энергии следует, что $mgH = 2mgR + \frac{mv^2}{2}$, откуда $\frac{mv^2}{R} =$

$$= \frac{2mgH}{R} - 4mg.$$

Подставляя это выражение в уравнение $N + mg = \frac{mv^2}{R}$, получаем $N = \frac{2mgH}{R} - 5mg$.

Минимальная начальная высота H_{\min} соответствует случаю, когда в верхней точке траектории желоб не давит на шарик, то есть в этой точке $N = 0$. Следовательно, минимальная начальная высота соответствует условию $\frac{2mgH}{R} - 5mg = 0$, откуда получаем

$$H_{\min} = \frac{5R}{2}.$$

При соскальзывании с высоты H_{\min} вес тела в верхней точке окружности равен нулю: при этом желоб не давит на тело, значит, на тело действует только сила тяжести, и поэтому оно движется с ускорением свободного падения.

В нижней точке окружности сила реакции желоба и ускорение тела направлены *вверх*, поэтому в проекциях на направленную вниз ось x уравнение второго закона Ньютона имеет вид $-N + mg = -\frac{mv^2}{R}$, откуда $N = \frac{mv^2}{R} + mg$. Из закона сохранения энергии следует, что $\frac{mv^2}{2} = mgH_{\min} = \frac{5}{2}mgR$, откуда $\frac{mv^2}{2} = 5mg$. Отсюда получаем, что в нижней точке траектории $N = 5mg + mg = 6mg$.

Согласно третьему закону Ньютона вес тела равен по модулю силе реакции желоба (вспомним, что вес — это сила, с которой тело давит на опору). Таким образом, *в нижней точке окружности вес тела в 6 раз больше силы тяжести*.

Что чувствует летчик при выполнении «мертвой петли»?

Приведенный выше вывод о весе тела в верхней и нижней точках окружности не зависит ни от массы тела, ни от радиуса окружности, поэтому он применим и к случаю, когда летчик при выполнении фигур высшего пилотажа делает «мертвую петлю». Как мы видим, если летчик в верхней точке «мертвой петли» находится в состоянии невесомости, то в нижней он испытывает *шестикратную перегрузку*.

Почему при демонстрации «мертвой петли» используют скатывающийся шарик?

Обычно при демонстрации «мертвой петли» используют шарик, который, скатываясь по желобу, описывает окружность. При этом, однако, начальная высота шарика должна быть несколько

больше, чем $\frac{5R}{2}$. Дело в том, что при скатывании шарика его потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию не только поступательного, но и *вращательного* движения. Поэтому чтобы шарик набрал скорость, необходимую для прохождения всей окружности, его начальная потенциальная энергия должна быть больше, чем для тела, соскальзывающего без трения.

Скатывание шарика используют при демонстрациях по той причине, что сила трения качения намного меньше силы трения скольжения. Обеспечить же настолько малую силу трения скольжения, чтобы эта демонстрация выглядела эффектно, обычно не удается.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1*. Два снежка в полете столкнулись и слиплись в один большой снежок. Перед столкновением скорости снежков были равны 10 м/с, направлены горизонтально и противоположно друг другу. Масса первого снежка 100 г, а масса второго снежка 200 г. Какова скорость большого снежка непосредственно после столкновения? Какая часть кинетической энергии снежков перешла во внутреннюю энергию?
- 2*. Белый шар налетел на покоящийся красный шар. Массы шаров одинаковы, удар можно считать упругим. Скорость белого шара перед столкновением 5 м/с. Какова скорость красного шара после столкновения, если в результате столкновения белый шар остановился?
- 3*. На нерастяжимой нити длиной 1 м подвешен шарик массой 100 г. Шарик отклоняют на некоторый угол и отпускают без толчка. Каков этот угол, если при прохождении шариком положения равновесия сила натяжения нити равна: а) 3 Н; б) 2 Н?
- 4*. Тело массой 1 кг движется по «мертвой петле». На сколько вес тела в нижней части петли больше, чем в верхней ее части?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Импульсом тела** \vec{p} называют векторную величину, равную произведению массы тела на его скорость: $\vec{p} = m\vec{v}$.
- **Закон сохранения импульса**: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не изменяется.

- Движение, при котором тело изменяет свою скорость, отбрасывая свою часть, называют **реактивным движением**. Примером реактивного движения является движение ракеты.
- Использовать ракеты для освоения космоса предложил российский ученый **К. Э. Циолковский**, который заложил основы теории ракетного движения. Запуск первого искусственного спутника Земли и первый полет человека в космос были осуществлены в Советском Союзе.
- **Работа постоянной силы** $A = Fs \cos \alpha$, где α — угол между направлением силы и направлением перемещения.
- **Работа силы тяжести** $A = mg(h_1 - h_2)$.
- **Мощностью** P называют отношение совершенной работы A к промежутку времени t , за который эта работа совершена: $P = \frac{A}{t}$. Мощность выражают через силу и скорость следующим образом: $P = Fv$.
- **Энергией** E называют физическую величину, характеризующую способность тела или системы тел совершать работу вследствие изменения своего состояния. Изменение энергии тела (системы тел) связано с совершаемой этим телом (системой тел) работой соотношением $\Delta E = -A$.
- Часть механической энергии, которая определяется **взаимодействием** тел, называют **потенциальной энергией**. Потенциальная энергия груза, поднятого над землей: $E_{\text{п}} = mgh$.
- Часть механической энергии, которая обусловлена **движением** тела, называют **кинетической энергией**. Кинетическая энергия тела $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$.
- **Закон сохранения механической энергии**: если между телами замкнутой системы действуют только силы тяготения и силы упругости, механическая энергия системы сохраняется: $E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \text{const}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ»

1. Два шара одинаковой массы движутся навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями. Равны ли импульсы этих шаров?
2. Бегущий человек развернулся и побежал в противоположном направлении. Не противоречит ли это закону сохранения импульса? Обоснуйте свой ответ.

3. На тележку поставили вентилятор. Когда его включили, тележка пришла в движение. Объясните это явление.
4. Планета движется вокруг Солнца по круговой орбите с постоянной по модулю скоростью. Изменяется ли при движении планеты ее импульс? кинетическая энергия?
5. Покоящийся вначале груз массой 1 кг поднимают, прикладывая к нему направленную вверх силу 30 Н. Какую работу совершает эта сила при подъеме груза на 1 м? Чему равно при этом изменение потенциальной энергии груза? кинетической энергии? Для простоты расчетов примите $g = 10 \text{ м/с}^2$.
6. Скорость автомобиля увеличилась с 50 км/ч до 100 км/ч. Во сколько раз увеличилось его импульс и кинетическая энергия?
7. Брусок соскальзывает с наклонной плоскости, двигаясь с постоянной скоростью. Изменяется ли потенциальная энергия бруска? кинетическая? Выполняется ли в данном случае закон сохранения механической энергии?
8. При увеличении скорости автомобиля в 2 раза сила сопротивления воздуха увеличилась в 4 раза. Во сколько раз увеличилась мощность, развиваемая двигателем?
9. По шоссе едут легковой автомобиль и грузовик. Масса легкового автомобиля в 3 раза меньше массы грузовика, а его скорость в 2 раза больше скорости грузовика. Импульс какого из автомобилей больше? У какого автомобиля больше кинетическая энергия?
10. После удара о стену направление скорости мяча изменилось на противоположное, но модуль скорости остался тем же. Как изменились импульс и кинетическая энергия мяча?

Глава 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ¹



В этой главе мы расскажем о механических колебаниях, которые очень распространены в природе и технике. Часто они полезны и даже необходимы: например, благодаря колебаниям барабанной перепонки мы воспринимаем звук. Но иногда колебания вредны и даже опасны — например, колебания зданий или мостов.

Мы рассмотрим также механические волны — возмущения, распространяющиеся в различных средах: газах, жидкостях и твердых телах. Волны пронизывают все вокруг нас. Некоторые волны мы видим — например, волны на воде, некоторые мы слышим — например, звуки музыки. Однако существуют механические волны, невидимые и неслышимые. О них мы тоже расскажем в этой главе.

¹ Эта тема изучается в курсе физики, рассчитанном на три урока в неделю.

§ 21. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1. Примеры и характеристики механических колебаний
2. Свободные колебания

В этом параграфе мы приведем примеры механических колебаний и дадим их основные характеристики.

Мы рассмотрим свободные колебания и покажем, что такие колебания возникают всегда, когда тело или система тел находится вблизи положения устойчивого равновесия.

1. ПРИМЕРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Механическим колебанием называют периодическое или почти периодическое движение тела.

Примеры

Подвесим груз на нити, отведем его в сторону от положения равновесия и отпустим.

Груз начнет двигаться к положению равновесия, но, достигнув его, по инерции пройдет дальше, на мгновение остановится, затем начнет двигаться обратно, вернется в начальное положение, и... весь процесс будет повторяться снова и снова (рис. 21.1, а). Это и есть колебания.

Наиболее характерным свойством колебаний является то, что каждое колебание происходит за одинаковый промежуток времени.

Колебания около положения равновесия совершает и груз, подвешенный на пружине (рис. 21.1, б).

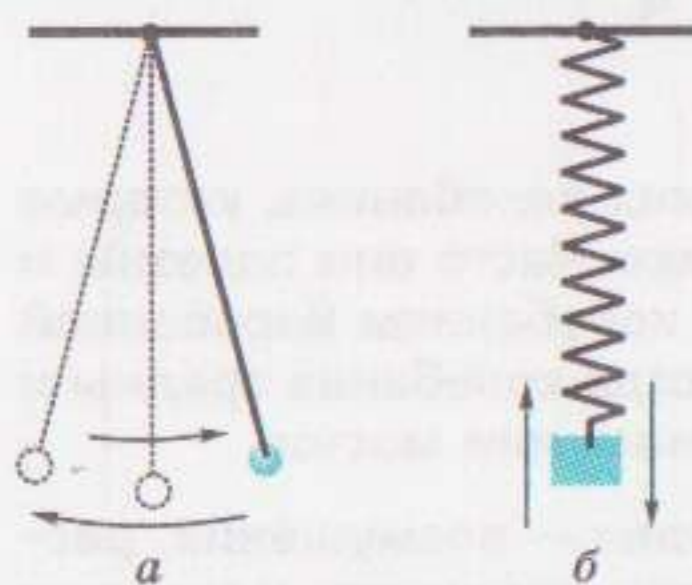


Рис. 21.1. Колебания груза: а — подвешенного на нити; б — подвешенного на пружине

Каждое колебание груза происходит за один и тот же промежуток времени.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ

Обозначим смещение от положения равновесия буквой x . При колебаниях эта величина периодически изменяется, в том числе изменяя знак, так как смещение от положения равновесия происходит то в одну, то в другую сторону.

Модуль наибольшего смещения от положения равновесия называют *амплитудой* колебаний. Мы будем обозначать амплитуду колебаний x_{\max} .

Промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание, называется *периодом* колебаний. Обозначают период T и измеряют в секундах.

Число колебаний за одну секунду называют *частотой* колебаний. Обозначают частоту буквой ν . Частота и период связаны соотношением $\nu = \frac{1}{T}$.

Единицей частоты является герц (Гц): $1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}}$. Частоте 1 Гц соответствует одно колебание в секунду.

2. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

При колебаниях скорость тела *изменяется*, то есть оно движется с *ускорением*. Значит, согласно второму закону Ньютона на это тело действуют силы со стороны других тел.

Например, на груз, подвешенный на нити, действуют сила тяжести со стороны Земли и сила упругости со стороны нити. В положении равновесия (когда нить вертикальна) эти силы компенсируют друг друга (рис. 21.2, а). Но при отклонении от положения равновесия сила тяжести и сила упругости не компенсируют друг друга. Равнодействующая этих сил и сообщает грузу ускорение при колебаниях (рис. 21.2, б).

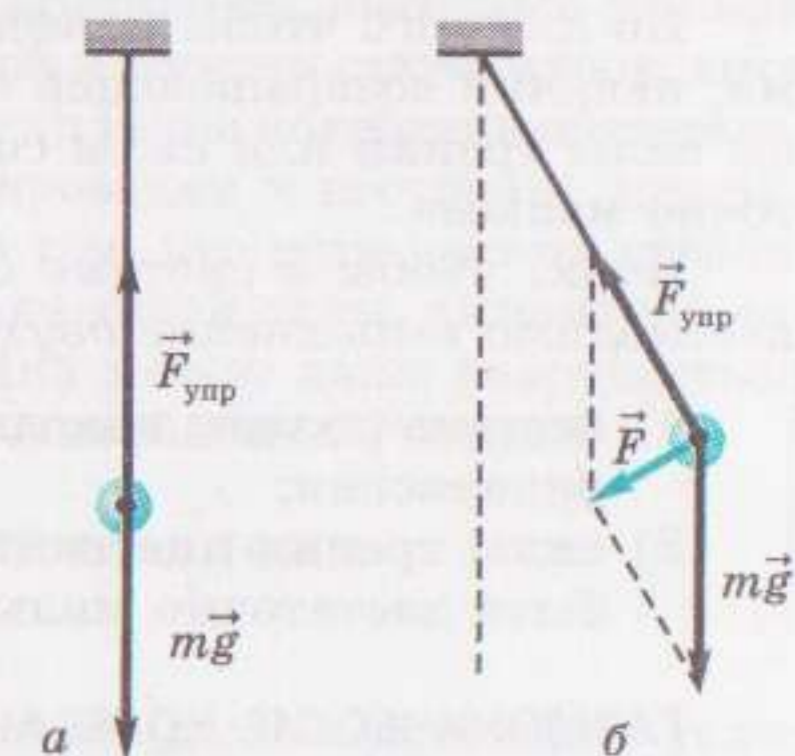


Рис. 21.2. Силы, действующие на груз, подвешенный на нити: а — в положении равновесия, равнодействующая этих сил равна нулю; б — при отклонении от положения равновесия, равнодействующая \vec{F} сообщает грузу ускорение

Итак, тело, совершающее колебания, является всегда одним из тел в *системе взаимодействующих тел*.

Например, если груз подвешен на нити, в эту систему входят, кроме самого груза, нить и притягивающая груз Земля. Если же груз подвешен на пружине, система состоит из груза, пружины и Земли.

В рассмотренных примерах колебания в системе совершаются под действием *внутренних* сил системы.

Колебания, которые совершаются под действием внутренних сил системы, называют свободными колебаниями, а систему, в которой могут происходить свободные колебания, называют колебательной системой.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В приведенных примерах (груз на нити и груз на пружине) система совершала колебания *около положения устойчивого равновесия*.

Это не случайно: положение устойчивого равновесия тела характеризуется как раз тем, что при отклонении от этого положения равнодействующая всех сил, приложенных к телу, стремится *возвратить* тело в положение равновесия (поэтому равновесие и называется устойчивым!).

Равнодействующую сил, действующих на тело (или систему) при отклонении от положения устойчивого равновесия, часто называют *возвращающей силой*.

Под действием возвращающей силы тело, отклонившись от положения равновесия, стремится вернуться в это положение, но вследствие инерции проходит его и отклоняется в *другую* сторону. Однако при этом снова возникает возвращающая сила, направленная теперь в *противоположную* сторону.

Так возникают колебания.

Но для того чтобы колебания продолжались длительное время, наличия возвращающей силы недостаточно — надо еще, чтобы силы трения или силы сопротивления в системе были достаточно малыми.

Итак, чтобы в системе совершались свободные колебания, необходимо выполнение *двух* условий:

- 1) система должна находиться **вблизи положения устойчивого равновесия**;
- 2) силы трения или силы сопротивления в системе должны **быть достаточно малыми**.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

При малых отклонениях от положения равновесия возвращающая сила прямо пропорциональна смещению от положения равновесия. В этом случае, как показывают расчеты, смещение x зависит от времени по закону синуса или косинуса.

Колебания, происходящие по закону синуса или косинуса, называют *гармоническими*.

На рис. 21.3 в качестве примера приведен график зависимости $x(t)$ для гармонических колебаний.

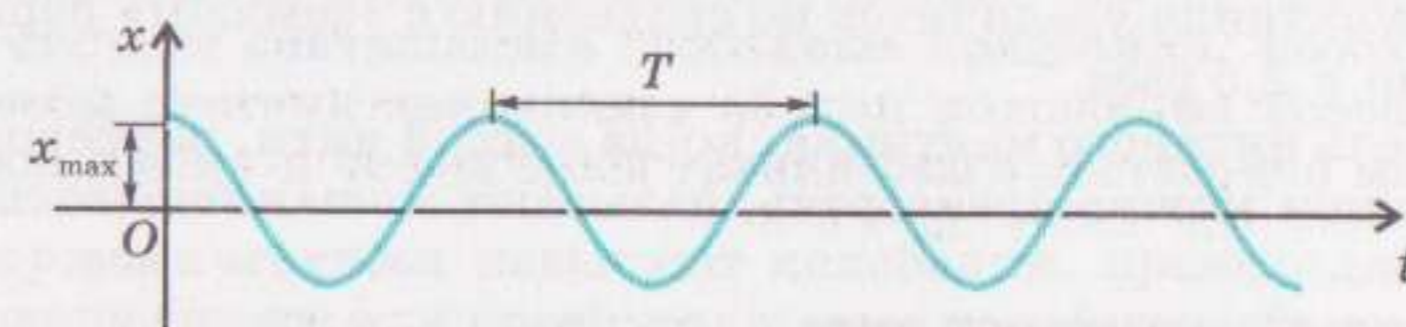


Рис. 21.3. График зависимости $x(t)$ при гармонических колебаниях

Гармонические колебания обладают замечательным свойством: частота (следовательно, и период) колебаний не зависит от их амплитуды. Это свойство лежит в основе действия механических часов.

То, что частота малых колебаний не зависит от их амплитуды, впервые заметил Галилей, наблюдая за колебаниями люстр в соборе во время церковной службы. Галилею было тогда 19 лет. Время он измерял по собственному пульсу.

КАК ЧАСТО ВСТРЕЧАЮТСЯ СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ?

Вблизи положения устойчивого равновесия находятся очень многие тела. А поскольку всегда существуют хотя бы малые воздействия, отклоняющие тело от положения равновесия, оно совершает свободные колебания. Вот почему свободные колебания так распространены в природе и технике.

Не всегда эти колебания заметны. Например, высотный дом при сильном ветре колеблется с амплитудой в десятки сантиметров, хотя жильцы дома этого не ощущают. Однако такие колебания обязательно должны учитываться при проектировании и постройке зданий, мостов и других сооружений. Дело в том, что если частота свободных колебаний совпадает с частотой внешней силы, амплитуда колебаний резко возрастает и постройка может даже разрушиться (см. § 22. *Превращения энергии при колебаниях. Резонанс*).

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИКИ

Математический маятник

Вы можете сами убедиться на опыте (даже в домашних условиях), что колебания груза, подвешенного на нити, обладают замечательным свойством: период этих колебаний не зависит от массы груза и определяется только длиной нити — *чем длиннее нить, тем больше период колебаний*.

Например, если вы хотите, чтобы период колебаний был равен примерно 1 с, возьмите нить длиной 25 см. А чтобы увеличить период колебаний вдвое, длину нити надо увеличить в 4 раза.

Кроме того, период свободных колебаний зависит от ускорения свободного падения: например, на Луне период колебаний того же маятника увеличится по сравнению с «земным» периодом примерно в 2,5 раза.

Модель нитяного маятника, когда массой нити, размером груза и трением можно пренебречь, называют *математическим маятником*.

Расчеты показывают, что

период малых колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина нити, g — ускорение свободного падения в данном месте.

Поскольку период колебаний математического маятника зависит от значения ускорения свободного падения, с помощью маятника можно производить очень точные измерения значения g . Благодаря этому можно исследовать земные недра, оставаясь на поверхности: например, над рудными месторождениями значение g увеличивается, а над газовыми — уменьшается.

Пружинный маятник

Подвешивая к пружине грузы разной массы, мы заметим, что с увеличением массы груза период колебаний груза увеличивается: например, при увеличении массы груза в 4 раза период колебаний увеличивается вдвое.

А если подвешивать один и тот же груз к пружинам разной жесткости, можно заметить, что с увеличением жесткости пружины период колебаний уменьшается.

Расчеты показывают, что

период малых колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, где m — масса груза, k — жесткость пружины.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Амплитудой колебаний** называют модуль наибольшего смещения относительно положения равновесия. **Периодом** колебаний называют промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание. **Частотой** колебаний называют число колебаний за одну секунду. Период T и частота ν связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$.

- **Свободными колебаниями** называют колебания, которые совершаются под действием внутренних сил системы. Чтобы в системе совершались свободные колебания, необходимо, чтобы система находилась вблизи положения устойчивого равновесия и чтобы силы трения были достаточно малы.

- **Гармоническими** называют колебания, происходящие по закону синуса или косинуса. Малые колебания обычно являются гармоническими.

- Период малых колебаний **математического маятника**

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, а период малых колебаний **пружинного маятника**

$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое механические колебания?
2. Приведите примеры механических колебаний.
3. Что такое амплитуда, период и частота колебаний?
4. Каково соотношение между частотой и периодом колебаний?
5. Какие колебания называют свободными?
6. Почему свободные колебания так распространены?
7. В какие моменты возвращающая сила, действующая на колеблющееся тело, равна нулю?
- 8*. Первый маятник за 50 с совершил 100 колебаний, а второй маятник за 3 мин совершил 180 колебаний. У какого маятника частота колебаний больше? Чему она равна? У какого маятника больше период колебаний? Чему он равен?
- 9*. Каковы условия возникновения свободных колебаний?
- 10*. Какова физическая природа возвращающей силы при колебаниях груза, подвешенного на пружине?
- 11*. Какова физическая природа возвращающей силы при колебаниях груза, подвешенного на нити?
- 12*. Какие тела образуют систему взаимодействующих тел при колебаниях груза, подвешенного на нити?
- 13*. Что такое гармонические колебания?
- 14*. При некоторых гармонических колебаниях смещение x изменяется по закону $x = 0,1 \cos(2\pi t)$, где длина измеряется в метрах, а время — в секундах. Чему равна амплитуда колебаний? период? частота?
- 15*. Какими формулами выражаются периоды малых колебаний математического и пружинного маятников?

§ 22. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ. РЕЗОНАНС

1. Превращения энергии при колебаниях
2. Вынужденные колебания

В этом параграфе мы покажем, что при колебаниях происходят превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно.

Рассмотрим также вынужденные колебания, происходящие под действием периодически изменяющейся внешней силы.

Когда частота изменения внешней силы совпадает с частотой собственных колебаний системы, амплитуда колебаний может резко возрасти. Это явление называется резонансом.

1. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

Если отклонить груз в сторону, он поднимется, и поэтому его потенциальная энергия увеличится (рис. 22.1, а).

Когда груз возвращается в положение равновесия, он опускается, а его скорость увеличивается, то есть потенциальная энергия груза уменьшается, а кинетическая — увеличивается.

При прохождении положения равновесия скорость груза и, следовательно, его кинетическая энергия максимальны, а высота груза и, следовательно, его потенциальная энергия — минимальны (рис. 22.1, б).

Таким образом,

при колебаниях происходят периодические превращения потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

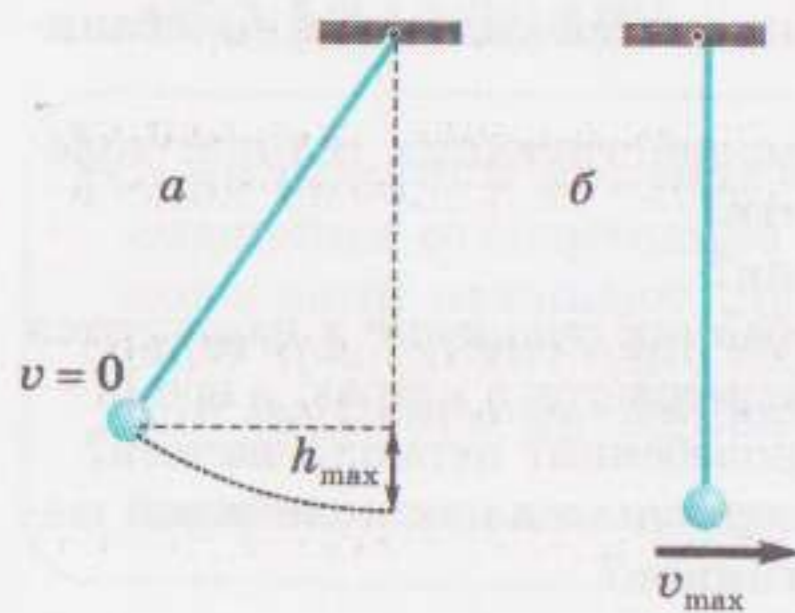


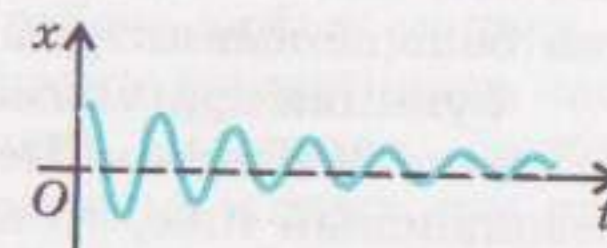
Рис. 22.1. Взаимные превращения потенциальной и кинетической энергии груза при колебаниях: а — при наибольшем отклонении от положения равновесия потенциальная энергия максимальна, а кинетическая энергия равна нулю; б — при прохождении грузом положения равновесия потенциальная энергия минимальна, а кинетическая — максимальна

Если бы трения в системе не было совсем, механическая энергия, то есть сумма потенциальной и кинетической энергии, сохранилась бы, вследствие чего колебания продолжались бы неограниченно долго. Именно избыток энергии системы по сравнению с минимальным ее значением (когда тело покоится в положении равновесия) и «заставляет» тело совершать колебания вновь и вновь.

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

При наличии трения амплитуда колебаний постепенно уменьшается, так как механическая энергия переходит во внутреннюю: тело и среда, в которой оно движется, нагреваются. Такие колебания называются *затухающими*. Пример графика затухающих колебаний приведен на рис. 22.2.

Рис. 22.2. График затухающих колебаний



Поскольку трение в той или иной степени присутствует в *любой* системе, свободные колебания всегда являются затухающими, хотя затухание колебаний может происходить в течение длительного времени. Например, тяжелый груз, подвешенный на длинной нити, может совершать колебания в воздухе в течение многих часов практически с неизменной амплитудой. Однако колебания этого же груза в воде затухнут уже через несколько минут, так как сопротивление воды намного больше сопротивления воздуха.

2. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Как мы уже знаем, при свободных колебаниях возвращающая сила является равнодействующей *внутренних* сил системы. По этой причине частота свободных колебаний определяется свойствами самой системы и называется поэтому *собственной* частотой.

Тело или система тел может также совершать колебания под действием *внешней периодически изменяющейся* силы. Скажем, качели можно раскачивать, периодически их подталкивая.

Колебания, совершаемые под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют *вынужденными* колебаниями.

Вынужденные колебания, если они происходят длительное время, совершаются *с частотой изменения внешней силы*¹.

¹ Мы рассматриваем только случай, когда внешняя сила изменяется по закону синуса или косинуса.

РЕЗОНАНС

Каждому с детства знаком нехитрый «физический опыт»: чтобы хорошенько раскачать качели, надо толкать их с частотой, равной их собственной частоте (то есть частоте свободных колебаний).

И другие опыты также свидетельствуют о том, что

когда частота изменения внешней силы совпадает с частотой собственных колебаний, амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Это явление называют резонансом.

На рис. 22.3 показан график зависимости амплитуды x_{\max} вынужденных колебаний от частоты ν внешней силы. Мы видим, что чем ближе частота ν внешней силы к собственной частоте ν_0 , тем больше амплитуда колебаний.

Функция $x_{\max}(\nu)$ имеет максимум при $\nu = \nu_0$, который называют *резонансным пиком*. Чем меньше сила трения в системе, тем выше резонансный пик, то есть тем больше амплитуда вынужденных колебаний.

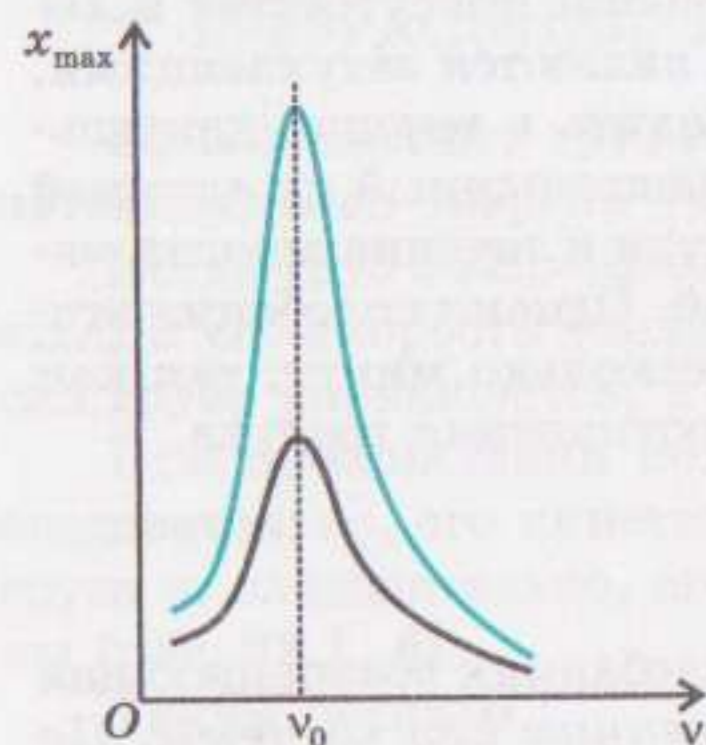


Рис. 22.3. Графики зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешней силы

Чем ближе частота ν изменения внешней силы к собственной частоте ν_0 , тем больше амплитуда вынужденных колебаний. Синяя кривая соответствует меньшей силе трения, а черная — большей.

Какова причина резонанса?

При резонансе колебания происходят таким образом, что направление движения тела все время совпадает с направлением внешней силы. В результате внешняя сила все время совершает *положительную работу*, «подкачивая» колебательную систему энергией *при каждом колебании*. Это и приводит к «раскачке» системы, то есть к увеличению амплитуды колебаний.

Если же частота изменения внешней силы не совпадает с частотой свободных колебаний, такой согласованности между направлением движения тела и направлением действующей на тело внешней силы не возникает и поэтому «раскачки» системы не происходит.

Может ли резонанс быть опасным?

В 1905 году в Петербурге разрушился один из мостов через реку Фонтанку, когда по нему проходил «в ногу» кавалерийский эскадрон. Причиной разрушения моста мог быть резонанс: возможно частота одновременных ударов лошадиных копыт по мосту совпала с собственной частотой колебаний моста.

В 1940 году в США огромный висячий мост длиной почти в километр раскачался до амплитуды 1,5 метра и рухнул. Причиной разрушения и тут оказался резонанс: под действием ветра от моста периодически отрывались воздушные вихри, и частота отрыва вихрей совпала с собственной частотой колебаний моста.

Поэтому при проектировании сооружений особое внимание уделяют возможности возникновения резонанса.

Резонанс представляет опасность при работе любых машин, в которых есть вращающиеся или периодически движущиеся части (а они есть практически во всех машинах). Например, «разбалансировка» вала станка или двигателя приводит к тому, что при вращении вала возникает периодическая сила, действующая на основу механизма, а через нее — на здание. Если частота этой силы окажется близкой к собственной частоте здания, амплитуда колебаний здания может возрасти настолько, что это приведет к разрушениям.

Чтобы избежать нежелательных проявлений резонанса, изменяют либо частоту внешней силы, либо собственную частоту системы. Резонанс можно уменьшать, увеличивая силы сопротивления или трения: как мы знаем, высота резонансного пика при этом уменьшается.

Может ли резонанс быть полезным?

Явление резонанса используется во всех музыкальных инструментах для усиления звука (см. § 23. *Механические волны. Звук*). Резонанс находит применение также во многих приборах, в том числе измерительных.

В быту резонанс часто используют, когда надо сдвинуть с места что-либо тяжелое, например застрявший автомобиль. В таком случае интуитивно подбирают частоту толчков так, чтобы она совпала с собственной частотой системы. В результате амплитуда колебаний возрастает и, наконец, становится настолько большой, что тело уже не возвращается в прежнее положение.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- При колебаниях происходят *периодические превращения энергии* — из потенциальной в кинетическую и обратно.

- **Вынужденными колебаниями** называют колебания, совершаемые под действием внешней периодической силы.
- Когда частота изменения внешней силы совпадает с частотой свободных колебаний системы, амплитуда колебаний резко возрастает. Это явление называют **резонансом**.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Груз, подвешенный на нити, движется к положению равновесия. Как изменяются при этом кинетическая и потенциальная энергии груза?
2. Груз, подвешенный на нити, движется от положения равновесия. Как изменяется при этом механическая энергия груза? Трением можно пренебречь.
3. Что такое вынужденные колебания?
4. В чем состоит явление резонанса?
5. Может ли резонанс быть опасным? Приведите примеры, иллюстрирующие ваш ответ.
6. Может ли резонанс быть полезным? Приведите примеры, иллюстрирующие ваш ответ.
7. Какие превращения энергии происходят при свободных колебаниях?
- 8*. При каком положении груза, подвешенного на нити и совершающего колебания, его кинетическая энергия максимальна? минимальна?
- 9*. При максимальном отклонении от положения равновесия подвешенный на нити груз поднимается на 3 см по сравнению с положением равновесия. На какой высоте по сравнению с положением равновесия находится груз, когда его кинетическая энергия равна потенциальной? За нулевой уровень потенциальной энергии выбрано положение равновесия.
- 10*. Чем отличаются вынужденные колебания от свободных?
- 11*. Какова причина резонанса?
- 12*. Как зависит высота резонансного пика от величины силы трения?

§ 23. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

1. Механические волны
2. Звук

В этом параграфе мы рассмотрим механические волны, распространяющиеся в различных средах.

Мы опишем основные характеристики, свойства и виды волн. Рассмотрим также свойства звуковых волн, ультразвук и инфразвук.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Когда какое-либо тело движется в среде, оно «возмущает» среду, то есть приводит частицы среды в движение.

Вследствие взаимодействия частиц среды между собой возмущения среды распространяются в пространстве.

Возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называют механическими волнами.

Примеры механических волн — волны на воде, звуковые волны, а также волны, распространяющиеся вдоль шнура или пружины.

Основное внимание мы уделим волнам, распространяющимся в среде, когда источник волн совершает *гармонические колебания*.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ВОЛН

Частота, период, длина и амплитуда волны

Если источник волн совершает гармонические колебания, то каждая точка среды, в которой распространяется волна, также совершает гармонические колебания, причем с той же частотой, что и источник волн. В таком случае волна имеет характерную синусоидальную форму, показанную на рис. 23.1. Максимумы волны называют ее *гребнями*.

Частоту ν колебаний каждой точки среды называют *частотой волны*. Величину T , обратную частоте, называют *периодом волны*:

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

Расстояние λ между соседними гребнями волны называют *длиной волны*.

Модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия называют *амплитудой волны*.

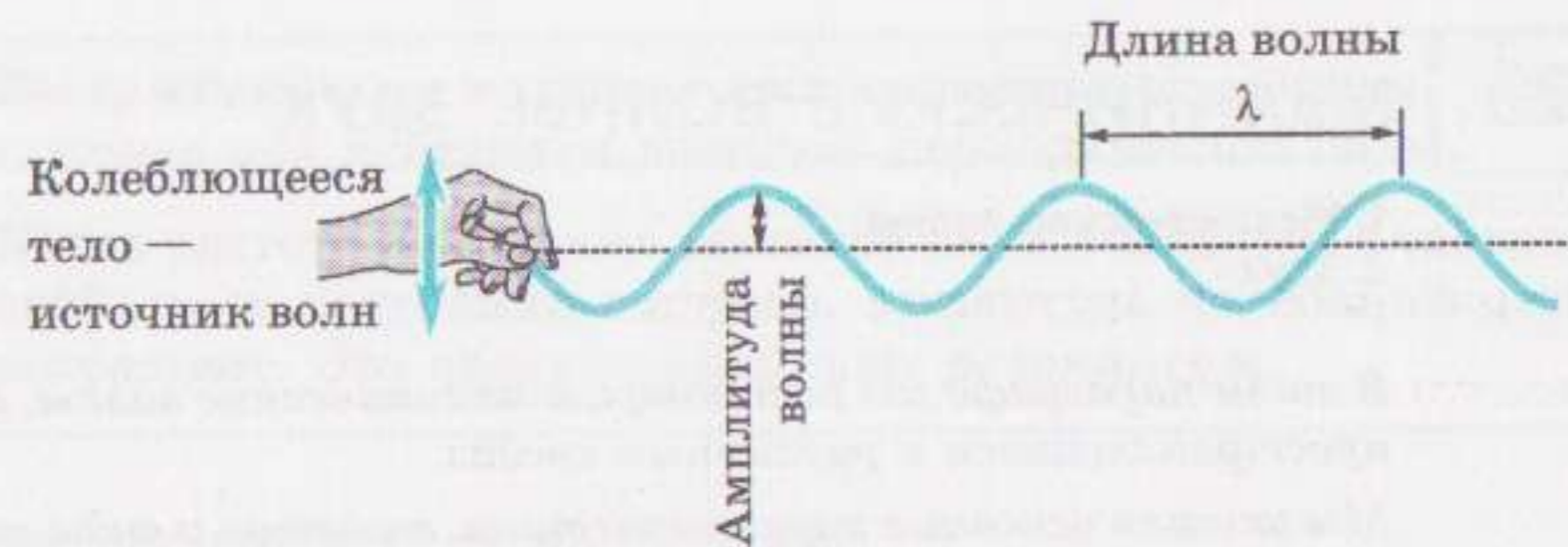


Рис. 23.1. Волна на шнуре

Источником волны является движущаяся рука.
Показаны длина волны и амплитуда.

Форма волны характеризуется длиной волны и амплитудой. Для наглядности на рис. 23.2 изображены две волны с одинаковой длиной волны, но различными амплитудами, а на рис. 23.3 — две волны с одинаковой амплитудой, но разными длинами волн.



Рис. 23.2. Волны с одинаковой длиной, но различными амплитудами

Положения гребней волн отмечены пунктирными линиями, чтобы было видно, что длины волн одинаковы.

Рис. 23.3. Волны с одинаковой амплитудой, но различными длинами волн

Наибольшие отклонения от положения равновесия отмечены пунктирными линиями, чтобы было видно, что амплитуды волн одинаковы.

Скорость волны

Скорость движения волны — это скорость движения ее гребней. 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* $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$.

На рис. 23.4 изображены последовательные положения волны с интервалом в $\frac{1}{4}$ периода.

Направление распространения волны

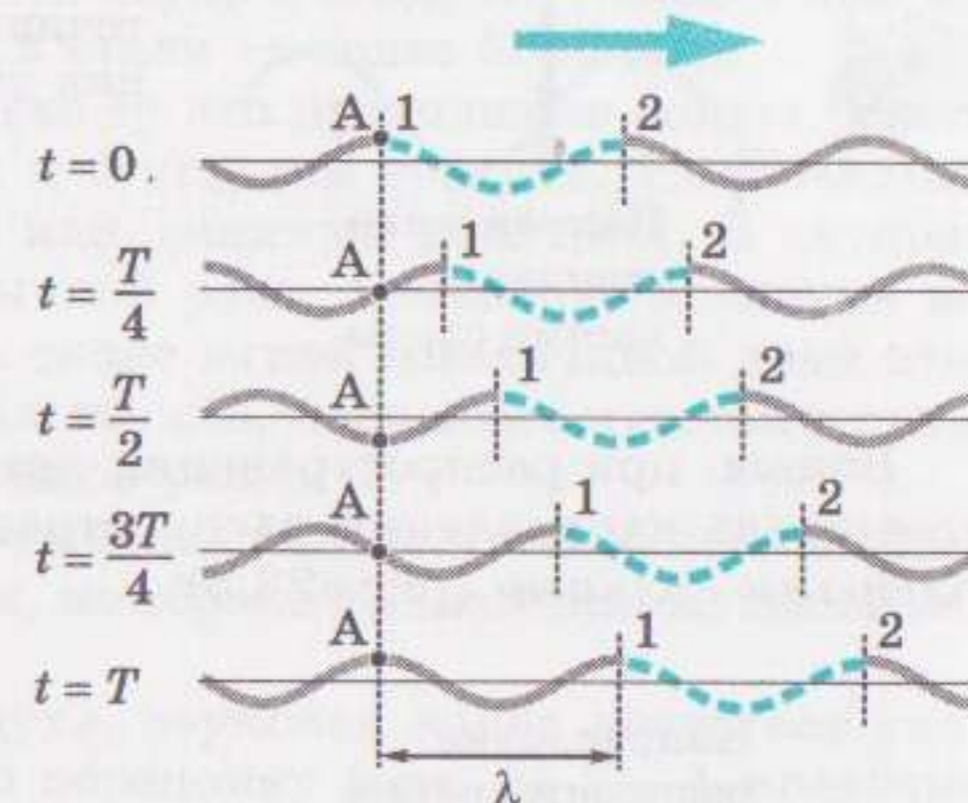


Рис. 23.4. Последовательные положения волны

За время, равное одному периоду T , любая точка среды совершает одно полное колебание, а волна смещается на расстояние, равное длине волны (обратите внимание на точку среды A и на выделенный синим пунктиром участок волны между соседними гребнями).

Переносят ли волны вещество и энергию?

Когда волна движется, частицы среды совершают колебания около положений равновесия, поэтому их средняя скорость равна нулю. Следовательно, *волны не переносят вещество*.

Однако *волны переносят энергию*: ведь волны — это колебания, распространяющиеся в пространстве, а колеблющиеся частицы среды обладают энергией.

Интерференция волн

Волны от различных источников распространяются *независимо одна от другой*, благодаря чему они свободно «проходят» друг сквозь друга: мы слышим одновременно звуки различных инструментов оркестра или голоса нескольких людей.

При наложении волн с одинаковыми длинами волн может наблюдаться очень интересное явление: в одних точках пространства волны будут усиливать друг друга, а в других точках — ослаблять (вплоть до полного гашения). Это явление называют *интерференцией волн*.

ПОПЕРЕЧНЫЕ И ПРОДОЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

При распространении волны частицы среды могут смещаться либо перпендикулярно направлению распространения волны, либо вдоль этого направления.

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются перпендикулярно направлению распространения волны, называют *поперечными волнами* (рис. 23.5).



Рис. 23.5. Пример поперечной волны: волна, бегущая по шнуру, когда источник колебаний совершает колебания поперек шнура

Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют *продольными волнами* (рис. 23.6).



Рис. 23.6. Пример продольной волны: разрежения и сжатия, бегущие вдоль пружины, когда источник колебаний совершает колебания вдоль пружины

Поперечные волны распространяются только в *твёрдых* телах, так как для распространения поперечных волн необходимо, чтобы между частицами вещества существовали силы, препятствующие изменению *формы* тела¹.

Продольные волны могут распространяться в *любой* среде, так как для распространения продольных волн необходимо, чтобы между частицами вещества существовали силы, препятствующие изменению *объёма* тела. Такие силы (силы давления) существуют во всех средах — твёрдых, жидких и газообразных.

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 не поперек и не вдоль распространения волны, а по окружностям. Распространение волн вдоль границы раздела двух сред (в данном случае — воды и воздуха) требует отдельного рассмотрения, выходящего за рамки нашего курса.

2. ЗВУК

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Человеческое ухо воспринимает как звук колебания с частотами от 20 Гц до 20 кГц. Поэтому механические волны с частотами, лежащими в этом диапазоне, называют *звуковыми волнами*.

Скорость распространения звуковых волн в разных средах различна. Например, скорость звука в воздухе — около 330 м/с, в воде — около 1500 м/с, а в стали — более 5000 м/с.

Звуковые волны в воздухе — это продольные волны, то есть чередующиеся разрежения и сгущения воздуха. Разрежения и сгущения сопровождаются изменениями давления. В звуковой волне, соответствующей обычной речи, изменение давления воздуха составляет всего лишь около одной миллионной доли атмосферного давления. Представьте себе, насколько чувствительным прибором является человеческое ухо!

Порождаются звуковые волны каким-либо колеблющимся телом: голосовыми связками, мембраной динамика, музыкальными инструментами и т. п.

Распространяясь в воздухе, звуковая волна достигает уха и воздействует на барабанную перепонку (рис. 23.7). А колебания барабанной перепонки благодаря сложному устройству уха и мозга преобразуются в слуховые ощущения.



Рис. 23.7. Схематическое изображение звуковых волн в воздухе

Поставим опыт

Убедимся на опыте в том, что, если разорвать «воздушную связь» между источником звука и ухом, звук не будет слышен. Поместим электрический звонок под стеклянный колокол, соединённый с воздушным насосом (рис. 23.8). Включим звонок и начнем откачивать воздух. По мере откачивания звук будет становиться все тише и тише, хотя сквозь стекло видно, что молоточек «старается» по-прежнему, ударяя в чашку звонка.



Рис. 23.8. Звонок под колоколом воздушного насоса

Если под колоколом нет воздуха, звук звонка не слышен.

Ультразвук и инфразвук

У многих животных верхняя граница частоты воспринимаемого ими «звука» значительно выше, чем у человека: например, у собак она равна 60 кГц, у летучих мышей — 150 кГц, а у дельфинов — 200 кГц. Поэтому дельфины могут активно «беседовать» совершенно неслышно для человека.

Механические волны с частотой выше звукового диапазона называют *ультразвуком*, а с частотой ниже звукового диапазона — *инфразвуком*.

Ультразвук широко используется в технике и в медицине, — например, ультразвуковое исследование внутренних органов (УЗИ) предпочитают сегодня рентгеновскому, поскольку оно безопаснее для организма.

Инфразвуковые же колебания опасны для организма, так как они иногда вызывают резонанс внутренних органов. Человек не слышит этих колебаний ухом, но воспринимает их как неприятные ощущения. Инфразвуковые колебания вызываются, например, землетрясениями или вибрацией тяжелых механизмов. Возможно, эти колебания ощущаются некоторыми животными: известно, что собаки и кошки пытаются покинуть дом перед землетрясением.

ВЫСОТА, ГРОМКОСТЬ И ТЕМБР ЗВУКА

Звук характеризуется высотой: например, бас поет низким голосом, а тенор — высоким. Опыты показывают, что *высота звука* определяется *частотой* звуковой волны: чем больше частота волны, тем звук выше.

Частота звуковых колебаний, соответствующих человеческому голосу, составляет от 80 Гц (низкий бас) до 1400 Гц (самый высокий женский голос — колоратурное сопрано). «Разговорный» частотный диапазон — от 85 до 340 Гц.

При увеличении частоты в 2 раза звук повышается на *октаву* — именно исходя из этого и была выбрана октава. Каждая октава делится на 12 интервалов в полтона каждый. На фортепиано им соответствуют семь белых клавиш и пять черных. Последние в нотной записи обозначаются знаком «диез» (в случае повышения звука на полтона) или «бемоль» (в случае понижения звука на полтона).

Громкость звука определяется в основном *амплитудой* звуковой волны.

Воспринимаемая ухом громкость зависит также от высоты звука, потому что ухо более чувствительно к одним частотам и менее чувствительно — к другим (наибольшая чувствительность соответствует частотам от 3 кГц до 5 кГц).

Единицей громкости является *децибел* (дБ), причем увеличению громкости на 10 дБ соответствует увеличение интенсивности¹ звука в 10 раз.

Например, тихому шепоту и шелесту деревьев соответствует громкость 20 дБ, обычной речи — 60 дБ, а рок-концерту — 120 дБ. Таким образом, интенсивность звука на рок-концерте в *миллион* раз больше интенсивности звука обычной речи!

Громкость, равную 120 дБ, называют болевым порогом. При длительном воздействии такого звука происходит необратимое ухудшение слуха: человек, привыкший к рок-концертам, уже никогда не услышит тихий шепот или шелест листьев.

«Окраска» звука определяется его *тембром*.

Например, только тембром отличаются голоса людей, говорящих и поющих в одном и том же диапазоне частот. Тембром отличаются и звуки различных музыкальных инструментов (скажем, скрипки и трубы), соответствующие одной и той же ноте.

Тембр звука зависит от набора *обертонов* — частот, кратных основной частоте звука. Чем больше обертонов, тем «насыщеннее», красивее звук. Чарующий серебристый оттенок голосов хороших певцов обусловлен именно наличием обертонов, особенно высоких.

АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Звук скрипичной струны слишком слаб, чтобы его можно было услышать на большом расстоянии, однако звук одной-единственной скрипки может наполнить огромный театральный зал.

Это происходит потому, что звук скрипичных струн многократно усиливается корпусом скрипки вследствие *резонанса*.

Благодаря резонансу усиливаются звуки и других музыкальных инструментов.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Механические волны* — это возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Источниками механических волн являются движущиеся (в том числе колеблющиеся) тела. Волны не переносят вещество, но переносят энергию.
- *Частотой волны* ν называют частоту колебаний каждой точки среды. Величину T , обратную частоте, называют *периодом*

¹ Интенсивностью звука называют отношение мощности звуковой волны к площади, на которую падает эта волна.

волны: $T = \frac{1}{\nu}$. **Длина волны** λ — это расстояние между ближайшими гребнями волны в один и тот же момент времени. **Амплитуда волны** — это модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия. **Скорость волны** $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$.

- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются перпендикулярно направлению распространения волны, называются **поперечными** волнами. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах. Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют **продольными** волнами. Продольные волны могут распространяться в любой среде.
- Механические волны с частотами от 20 Гц до 20 кГц называют **звуковыми волнами**. **Высота** звука определяется **частотой** звуковой волны, а **громкость** звука определяется в основном **амплитудой** звуковой волны.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое механические волны?
2. Что является источником механических волн?
3. Переносят ли механические волны вещество? энергию?
4. Какие волны называют поперечными?
5. Какие волны называют продольными?
6. Что такое звуковые волны?
7. Может ли звук распространяться в пустоте? Какой опыт может подтвердить ваш ответ?
8. Чему равна скорость звука в воздухе?
9. Чем определяются высота и громкость звука?
10. Каково соотношение между скоростью распространения волны, длиной волны и частотой волны?
- 11*. Две волны имеют одинаковую частоту, но скорость первой волны в 2 раза больше, чем скорость второй волны. Для какой из волн длина волны больше? Во сколько раз больше?
- 12*. Что такое интерференция волн?
- 13*. В каких средах могут распространяться поперечные волны? Обоснуйте свой ответ.
- 14*. В каких средах могут распространяться продольные волны? Обоснуйте свой ответ.



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Амплитудой колебаний** называют модуль наибольшего смещения от положения равновесия.
- **Периодом** колебаний называют промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание.
- **Частотой** колебаний называют число колебаний за одну секунду. Период T и частота ν связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$.
- **Свободными колебаниями** называют колебания, которые совершаются под действием внутренних сил системы. Чтобы в системе совершались свободные колебания, необходимо, чтобы система находилась вблизи положения устойчивого равновесия и чтобы силы трения или силы сопротивления были достаточно малыми.
- **Гармоническими** называют колебания, происходящие по закону синуса или косинуса. Малые колебания обычно являются гармоническими.
- Период малых колебаний **математического маятника** $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, а период малых колебаний **пружинного маятника** $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
- При колебаниях происходят **периодические превращения энергии** — из потенциальной в кинетическую и обратно.
- **Вынужденными колебаниями** называют колебания, совершаемые под действием внешней периодической силы.
- Когда частота изменения внешней силы совпадает с частотой свободных колебаний системы, амплитуда колебаний резко возрастает. Это явление называют **резонансом**.
- **Механические волны** — это возмущения среды, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Источниками механических волн являются движущиеся (в том числе колеблющиеся) тела. Волны не переносят вещество, но переносят энергию.
- **Частотой волны** ν называют частоту колебаний каждой точки среды. Величину, обратную частоте, называют **периодом волны**: $T = \frac{1}{\nu}$.

- **Длина волны λ** — это расстояние между ближайшими гребнями волны в один и тот же момент времени.
- **Амплитуда волны** — это модуль наибольшего смещения частиц среды от положения равновесия.
- **Скорость волны $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$.**
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются перпендикулярно направлению распространения волны, называют **поперечными** волнами. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.
- Волны, при распространении которых частицы среды смещаются вдоль направления распространения волны, называют **продольными** волнами. Продольные волны могут распространяться в любой среде.
- Механические волны с частотами от 20 Гц до 20 кГц называют **звуковыми волнами**. **Высота** звука определяется **частотой** звуковой волны, а **громкость** звука определяется в основном **амплитудой** звуковой волны.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

1. Тело за 20 с совершило 100 колебаний. Чему равен период колебаний?
2. При колебаниях груз, подвешенный на нити, проходит через положение равновесия через каждые 0,5 с. Чему равен период колебаний?
3. Какова частота колебаний, если их период равен 0,02 с? 30 с?
4. Равнодействующая каких сил играет роль возвращающей силы при колебаниях груза, подвешенного: а) на нити; б) на пружине?
5. Лодка качается на волне с частотой 0,5 Гц. Какова скорость этой волны, если расстояние между соседними гребнями равно 3 м?
6. Почему комар пищит, а пчела жужжит?

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 5 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



Молекулярная физика изучает свойства вещества на основе представления о том, что оно состоит из атомов и молекул, которые непрерывно движутся и взаимодействуют друг с другом.

Основой молекулярной физики является молекулярно-кинетическая теория, которая достигла больших успехов при объяснении свойств вещества в газообразном состоянии.

В этой главе мы кратко рассмотрим также строение вещества в других состояниях.

§ 24. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории
2. Основная задача молекулярно-кинетической теории

В этом параграфе мы рассмотрим основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование, а также сформулируем основную задачу молекулярно-кинетической теории.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

СУЩЕСТВОВАНИЕ МОЛЕКУЛ И ИХ РАЗМЕРЫ

Из курсов физики и химии основной школы вы знаете, что вещество состоит из атомов и молекул.

Мысль о том, что вещество состоит из мельчайших частиц, первыми высказали еще в 5-м веке до нашей эры древнегреческие философы Левкипп и Демокрит, которые утверждали, что в мире есть только атомы¹ и пустота.

В качестве довода они приводили такой например: вода, высыхая, дробится на такие мельчайшие части, которые не видны глазу.

Однако только через две с половиной тысячи лет после рождения атомной гипотезы — в конце 20-го века — наука достигла уровня, когда ученые смогли увидеть атомы (рис. 24.1).

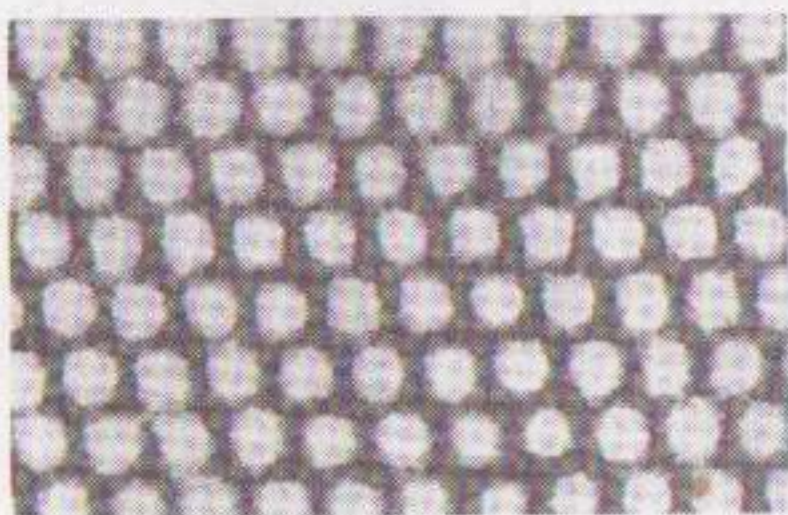


Рис. 24.1. Фотография поверхности золотой фольги, сделанная с помощью ионного микроскопа

Увеличение в 20 миллионов раз. Белые пятна — это изображения отдельных атомов золота!

Как оценить размеры молекул?

Если поместить капельку масла на поверхность воды, масло растечется по ней очень тонким слоем. Максимальная площадь масляной пленки соответствует ее толщине в одну молекулу. Зная объем капельки и площадь образовавшейся из нее масляной пленки, можно оценить размер одной молекулы масла.

¹ От греческого «атомос» — неделимый.

Например, капелька оливкового масла объемом 1 мм^3 растекается по площади не более 1 м^2 . Отсюда следует, что размер молекулы масла порядка 10^{-9} м .

Как можно представить размеры молекул и атомов?

Характерной длиной в мире молекул является $10^{-10} \text{ м} = 0,1 \text{ нм}$. Самая маленькая молекула — одноатомная молекула гелия — имеет размер около $0,2 \text{ нм}$. Размер молекулы воды, состоящей из двух атомов водорода и одного атома кислорода, — около $0,3 \text{ нм}$.

Чтобы вы могли представить размер молекулы воды, приведем сравнение: в одной чайной ложке воды содержится примерно столько же молекул воды, сколько чайных ложек воды в мировом океане. Значит, чтобы пересчитать молекулы воды в чайной ложке, понадобилось бы столько же времени, сколько нужно для того, чтобы вычерпать чайной ложечкой мировой океан!

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ

С какими скоростями движутся молекулы?

В окружающем нас воздухе молекулы носятся со скоростями артиллерийских снарядов — сотни метров в секунду. Мы не ощущаем отдельных ударов молекул потому, что массы молекул чрезвычайно малы, а дробь их ударов — очень частая. «Барабанная дробь» быстрых ударов крошечных молекул воспринимается как постоянное давление газа.

С такими же большими скоростями движутся атомы и молекулы окружающих нас жидких и твердых тел, в том числе и молекулы, из которых состоим мы сами.

В дальнейшем мы сможем вычислить скорости молекул и расскажем, как они были измерены (см. § 28. Температура и средняя кинетическая энергия молекул).

Броуновское движение

В начале 19-го века английский ботаник Броун, наблюдая в микроскоп крошечные частицы пыльцы растений, взвешенные в воде, обнаружил, что они пребывают в «вечной пляске», совершая непрерывное хаотическое движение.

Ученый предположил, что наблюдаемое им движение — это движение живых существ, и повторил опыт с растолченными в мельчайшую пыль кусочками камня. Но и частички камня «плясали без устали»!

Это «броуновское движение», как его назвали, оставалось загадкой для ученых целых 50 лет. Только в конце 19-го века ученые догадались, что это движение обусловлено бомбардировкой

частиц молекулами жидкости: если частица очень мала, удары молекул по ней с разных сторон не компенсируют друг друга, что и вызывает непрерывное хаотическое движение частицы.

Хаотичность движения броуновских частиц иллюстрирует рис. 24.2. На фотографии, сделанной с помощью микроскопа, отрезками соединены последовательные положения броуновской частицы через 30 с. Если бы положения частицы отмечались не через 30 с, а через 1 с, то каждый отрезок заменился бы столь же причудливой ломаной из 30 отрезков.

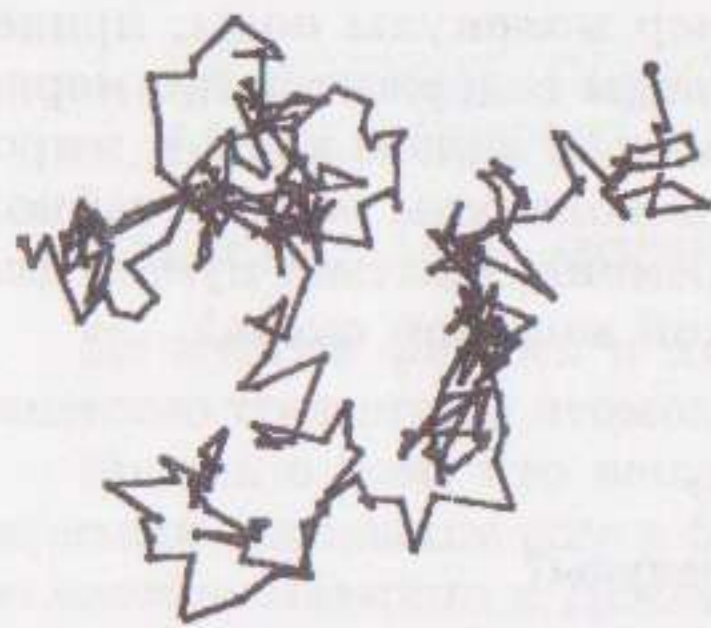


Рис. 24.2. Броуновское движение

На этом рисунке каждый отрезок ломаной заменяет собой такую же сложную ломаную!

Броуновское движение явилось первым опытным подтверждением молекулярного строения вещества: оно сыграло роль «мостика» между *макромиром* — миром наблюдаемых непосредственно тел — и *микромиром*¹ — миром молекул и атомов. В начале 20-го века А. Эйнштейн и польский физик М. Смолуховский построили теорию броуновского движения, благодаря которой удалось оценить размеры молекул.

Почему движение молекул никогда не прекращается?

Движение молекул разительно отличается от движения окружающих нас предметов тем, что движение молекул *никогда не прекращается*. Механическое же движение, как мы уже знаем, из-за трения замедляется и в конце концов прекращается. Почему же не останавливаются из-за трения молекулы?

Дело в том, что вследствие трения *механическое движение превращается* именно в хаотическое (тепловое) *движение молекул* — ведь в результате трения тела *нагреваются*. Но самим молекулам передать энергию уже некуда — они движутся в пустоте, сталкиваясь только друг с другом. При столкновениях молекул их кинетическая энергия перераспределяется между ними таким образом, что *средняя* кинетическая энергия молекул остается неизменной.

¹ Названия происходят от греческих слов «макро» — большой и «микро» — малый.

Вечное движение крошечных молекул сходно в этом смысле с вечным движением огромных планет — планеты, так же как и молекулы, движутся в пустоте и поэтому их механическая энергия остается практически неизменной в течение сотен миллионов лет.

Диффузия

Нальем в высокий стеклянный сосуд голубой раствор медного купороса (сульфата меди), а поверх него — чистую воду. Граница раздела жидкостей сначала будет резкой, но постепенно она начнет размываться. Значит, молекулы медного купороса проникают в воду, а молекулы воды — в медный купорос. Это взаимное проникновение частиц одного вещества в другое обусловлено движением молекул и называется *диффузией* (от латинского «диффузио» — распространение, растекание).

Диффузия происходит также в газах и даже в твердых телах. Это означает, что молекулы находятся в беспрестанном хаотическом движении, то есть *диффузия является опытным подтверждением движения молекул*.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ

Природа взаимодействия молекул

Взаимодействие молекул имеет электрическую природу. Хотя молекулы в целом электрически нейтральны, распределение положительных и отрицательных электрических зарядов в них таково, что на больших расстояниях (по сравнению с размерами самих молекул) молекулы притягиваются, а на малых расстояниях — отталкиваются.

Взаимодействие молекул описывается с помощью *квантовой механики* — науки о движении и взаимодействии мельчайших частиц вещества. Об основных ее положениях мы расскажем в курсе физики 11-го класса.

Проявление взаимодействия молекул

Притяжением молекул обусловлено существование жидкостей и твердых тел: не будь этого притяжения, жидкости и твердые тела рассыпались бы на отдельные молекулы (превратившись в газы).

На очень малых расстояниях притяжение молекул сменяется *отталкиванием*, благодаря чему жидкости и твердые тела практически несжимаемы, то есть оказывают большое сопротивление уменьшению их объема.

Силами притяжения и отталкивания молекул объясняются упругость и прочность твердых тел (см. § 8. *Силы в механике. Сила упругости*).

Поставим опыты

1. Чтобы получить некоторое представление о величине сил взаимодействия между молекулами, попробуйте разорвать стальную или капроновую нить сечением 1 мм^2 . Мало кто сможет это сделать, а ведь усилиям всего вашего тела «противостоят» силы притяжения крошечных молекул в малом сечении нити!

2. На рис. 24.3 изображена демонстрация, наглядно доказывающая существование сил межмолекулярного притяжения.

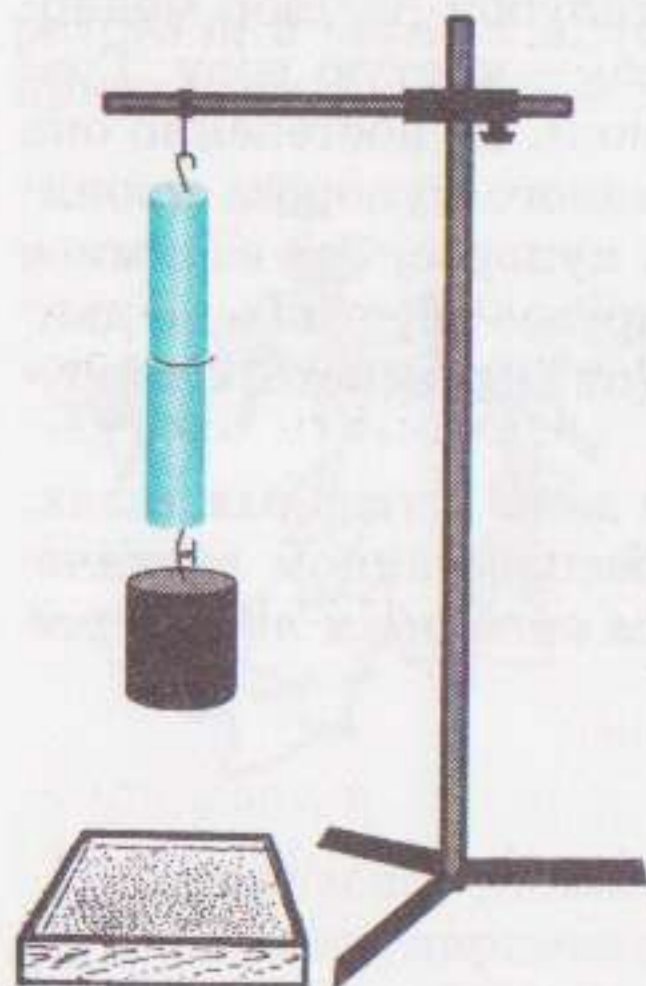


Рис. 24.3. Сцепление свинцовых цилиндров

Если плотно прижать друг к другу свинцовые цилиндры с хорошо зачищенными торцами, они вследствие сил межмолекулярного притяжения «сцепляются» настолько прочно, что к ним можно подвесить килограммовую гирию.

ТРИ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Таким образом, исходя из опытов, мы можем сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории:

- все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул;
- частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении;
- частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

2. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Молекулярно-кинетическая теория связывает свойства вещества с движением и взаимодействием молекул.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел, называются *макроскопическими* параметрами.

Примеры макроскопических параметров: масса образца, его объем, давление и температура.

Макроскопические параметры применимы только к макроскопическим телам: бессмысленно говорить, например, о давлении или температуре одной молекулы.

Величины, характеризующие свойства отдельных молекул, называются *микроскопическими* параметрами.

Примеры микроскопических параметров: масса молекулы, средняя скорость молекул и их средняя кинетическая энергия.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

Опыт показывает, что макроскопические параметры, характеризующие данный образец вещества, связаны друг с другом. Например, если при постоянном давлении увеличивать температуру газа, его объем увеличится.

Задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы объяснить эту закономерность и другие соотношения между макроскопическими параметрами на основе представления о движении и взаимодействии молекул.

Чтобы сформулировать эту задачу более четко, введем понятие *уравнения состояния*. Так называется соотношение между макроскопическими параметрами — например, температурой, объемом и давлением.

Основная задача молекулярно-кинетической теории — вывести уравнение состояния вещества, установив связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами.

В нашем курсе мы сможем (и то с некоторыми упрощениями) решить основную задачу молекулярно-кинетической теории только для самого простого случая — когда вещество находится в газообразном состоянии.

Но и при этом мы сможем многое узнать о мире молекул.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Все вещества состоят из мельчайших частиц, которые находятся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействуют друг с другом.
- *Диффузией* называют взаимное проникновение частиц одного вещества в другое, обусловленное движением молекул.
- Величины, характеризующие состояние макроскопических тел в целом, называют *макроскопическими* параметрами. Основные макроскопические параметры — давление, объем и температура.

- Величины, характеризующие свойства отдельных молекул вещества, называют *микроскопическими* параметрами. Примеры микроскопических параметров — масса молекулы и ее средняя кинетическая энергия.
- *Уравнением состояния* называют соотношение между макроскопическими параметрами — температурой, объемом и давлением.
- *Основная задача молекулярно-кинетической теории* — вывести уравнение состояния вещества, установив связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие вам известны свидетельства существования атомов?
2. Опишите опыт, с помощью которого можно оценить размер молекулы.
3. Что такое диффузия? Проиллюстрируйте свой ответ примером.
4. Какие опыты и наблюдения указывают на то, что молекулы взаимодействуют друг с другом?
5. Каковы основные положения молекулярно-кинетической теории?
6. Приведите примеры опытного обоснования положений молекулярно-кинетической теории.
7. Что такое броуновское движение? О чем оно свидетельствует?
- 8*. Почему броуновское движение никогда не прекращается?
- 9*. Каковы характерные размеры атомов и молекул?
- 10*. Почему броуновское движение сыграло важную роль в становлении молекулярно-кинетической теории?
- 11*. Какова природа взаимодействия молекул?
- 12*. Почему движение молекул никогда не прекращается?
- 13*. Ощущаем ли мы удары молекул, из которых состоит воздух? Если да, то как?
- 14*. Что такое макроскопические параметры? Приведите примеры.
- 15*. Что такое микроскопические параметры? Приведите примеры.
- 16*. Что такое уравнение состояния?
- 17*. В чем состоит основная задача молекулярно-кинетической теории?

§ 25. КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА. ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО

1. Относительная молекулярная (атомная) масса
2. Количество вещества

Многие важные свойства образца вещества определяются количеством молекул в этом образце: часто оно оказывается даже более существенным, чем масса образца.

В этом параграфе мы рассмотрим физическую величину, которая определяет количество молекул.

1. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ (АТОМНАЯ) МАССА

Массы атомов и молекул, как и любые массы, можно выражать в килограммах: например, масса молекулы воды равна примерно $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Однако намного удобнее сравнивать массы атомов и молекул с массой самого легкого атома — атома водорода, поскольку массы всех атомов и молекул с высокой точностью *кратны* массе этого атома. Например, масса атома углерода примерно в 12 раз больше массы атома водорода.

Мы не случайно упомянули об углероде: по чисто техническим причинам¹ в качестве *атомной единицы массы* (сокращенно а.е.м.) выбрали именно $\frac{1}{12}$ массы атома углерода. Однако для большинства расчетов (в том числе при решении задач) можно принять, что 1 а.е.м. равна массе атома водорода.

Массу молекулы, выраженную в атомных единицах массы, называют *относительной молекулярной массой*. Относительная молекулярная масса обозначается M_r .

Итак,

относительная молекулярная масса M_r равна отношению массы m_0 молекулы данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы атома углерода m_{0c} , то есть $M_r = \frac{m_0}{\left(\frac{1}{12}\right)m_{0c}}$.

Примеры

1. Относительная молекулярная масса гелия равна 4, так как гелий — одноатомный газ и масса атома гелия в 4 раза больше массы атома водорода, которую можно считать равной 1 а.е.м.

¹ Обусловленных точностью воспроизведения единицы измерения.

2. Относительная молекулярная масса водорода равна 2 (так как водород — двухатомный газ).

Аналогично относительной молекулярной массе определяется и *относительная атомная масса* как масса атома, выраженная в атомных единицах массы.

КАК НАЙТИ ОТНОСИТЕЛЬНУЮ АТОМНУЮ И МОЛЕКУЛЯРНУЮ МАССУ

Значение относительной атомной массы для атомов данного элемента можно найти в Периодической системе элементов (таблице Менделеева). Обычно при расчетах округляют приведенное в ней значение до целого¹. Например, относительные атомные массы гелия, углерода и кислорода равны соответственно 4, 12 и 16.

Чтобы определить относительную молекулярную массу вещества, надо знать его химическую формулу и относительные атомные массы атомов, входящих в состав молекулы данного вещества.

Пример

Относительная молекулярная масса воды равна 18, так как согласно химической формуле воды (H_2O) молекула воды состоит из двух атомов водорода (с относительной атомной массой 1) и одного атома кислорода (с относительной атомной массой 16).

2. КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА

Величина, которая определяет количество молекул в данном образце вещества, называется *количеством вещества*.

ЕДИНИЦА КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА — МОЛЬ

Массы веществ, вступающих в химические реакции, задают обычно в граммах. Поэтому в качестве единицы количества вещества удобно выбрать такое количество молекул, чтобы их общая масса, выраженная в граммах, была численно равна массе одной молекулы, выраженной в а.е.м. (то есть относительной молекулярной массе).

Эту единицу количества вещества назвали «моль».

Так как 1 а.е.м. равна $\frac{1}{12}$ массы углерода, то

один моль — это количество вещества, которое содержит столько же молекул, сколько атомов углерода содержится в 12 г углерода.

¹ Значительные отличия от целых чисел относительных атомных масс в таблице Менделеева обусловлены существованием в природе *изотопов* — атомов одного и того же вещества с различными массами.

Количество вещества в данном образце, выраженное в молях, обозначается ν .

Для большинства расчетов (в том числе при решении задач) можно принять, что один моль содержит столько же молекул, сколько атомов водорода содержится в 1 г водорода.

Примеры

1. Один моль водорода имеет массу 2 г, поскольку относительная молекулярная масса водорода равна 2 (напомним, что молекула водорода состоит из двух атомов).

2. Один моль кислорода (O_2) имеет массу 32 г.

3. Один моль воды имеет массу 18 г (примерно одна столовая ложка).

Образцы разных веществ, содержащие одно и то же количество вещества (то есть одно и то же количество молекул), имеют обычно разные массы: образец, содержащий более массивные молекулы, имеет и большую массу. Например, масса одного моля кислорода в 16 раз больше массы одного моля водорода.

ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО

Согласно определению моля в одном моле любого вещества содержится *одно и то же количество молекул*. Измерения показали, что оно равно $6 \cdot 10^{23}$ (более точно $6,02 \cdot 10^{23}$). В честь итальянского ученого Амедео Авогадро, открывшего, что многие свойства газов определяются количеством молекул,

количество молекул в одном моле называют постоянной Авогадро: $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль.

Огромное значение постоянной Авогадро можно попытаться представить, прибегнув к вселенским масштабам.

Астрономы оценили, что количество галактик в наблюдаемой части Вселенной — около миллиарда (10^9), а каждая галактика содержит сотни миллиардов звезд (порядка 10^{11}). Значит, количество звезд в наблюдаемой части Вселенной порядка 10^{20} . Это огромное число, но оно в тысячи раз меньше, чем постоянная Авогадро, то есть количество молекул в одной столовой ложке воды!

Проясним смысл постоянной Авогадро на конкретном примере.

Пример

Масса одного моля воды, содержащего N_A молекул, равна 18 г, а масса одной молекулы воды равна 18 а.е.м. Таким образом, постоянная Авогадро является переводным множителем между граммом и атомной единицей массы: в одном грамме содержится N_A атомных единиц массы¹.

¹ Поэтому измерение постоянной Авогадро — это, по существу, измерение массы атома (например, атома углерода).

Молярная масса

Масса одного моля вещества называется *молярной массой*. Молярная масса обозначается M и измеряется в кг/моль.

Пример

Молярная масса воды равна $18 \text{ г/моль} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, а молярная масса водорода равна $2 \text{ г/моль} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Количество молекул N в образце связано с количеством вещества ν соотношением $N = \nu N_A$.

Пример

Если в образце $1,2 \cdot 10^{24}$ молекул, значит, в нем 2 моль, а если в образце 5 моль, значит, в нем $3 \cdot 10^{24}$ молекул.

В одном моле вещества массой M содержится N_A молекул массой m_0 каждая, поэтому $m_0 = \frac{M}{N_A}$.

Пример

Масса молекулы воды $M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, а масса молекулы водорода $M_{\text{H}_2} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} = 3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Так как M — масса одного моля, то количество вещества в образце массой m равно $\nu = \frac{m}{M}$. Количество молекул в образце $N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A$.

Примеры

1. В 180 г воды содержится 10 моль (так как масса одного моля воды равна 18 г) и, следовательно, $6 \cdot 10^{24}$ молекул.
2. В 1 кг водорода содержится 500 моль (масса одного моля водорода равна 2 г) и, следовательно, $3 \cdot 10^{26}$ молекул.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Атомная единица массы** (а.е.м.) равна $\frac{1}{12}$ массы атома углерода. С хорошей точностью можно считать атомную единицу массы равной массе атома водорода.

- **Относительная молекулярная масса** M_r равна массе молекулы, выраженной в атомных единицах массы.
- **Один моль** — это количество вещества, которое содержит столько же молекул, сколько атомов углерода содержится в 12 г углерода. Количество вещества в молях обозначается ν .
- **Постоянной Авогадро** называют количество молекул в одном моле: $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$.
- **Молярная масса** M равна массе одного моля. Масса образца m связана с молярной массой соотношением $m = M\nu$. Масса m_0 молекулы вещества связана с его молярной массой соотношением $m_0 = \frac{M}{N_A}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое атомная единица массы? Чему она равна?
2. Что такое относительная молекулярная (атомная) масса?
3. Чему равна относительная атомная масса водорода?
4. Чему равна относительная молекулярная масса кислорода?
5. Что такое количество вещества?
6. В чем измеряют количество вещества?
7. Сколько молекул в одном моле?
8. Что такое постоянная Авогадро? Чему она равна?
9. Что такое молярная масса?
10. Чему равна относительная молекулярная масса воды?
- 11*. Какова масса одного моля углекислого газа?
- 12*. Сколько молей в литре воды?
- 13*. Как узнать относительную молекулярную (атомную) массу вещества?
- 14*. Как связаны масса молекулы, молярная масса и постоянная Авогадро?
- 15*. Как узнать количество молекул в данном теле, если известны масса тела и молярная масса вещества?
- 16*. Сколько молекул в капле воды массой 0,1 г?
- 17*. Относительная молекулярная масса некоторого вещества равна 100 а.е.м. Сколько молей этого вещества содержится в образце массой 2 кг?

§ 26. ТЕМПЕРАТУРА

1. Температура и ее измерение
2. Абсолютная шкала температур

В этом параграфе мы рассмотрим различные способы измерения температуры и введем абсолютную шкалу температур, связанную с особенностями расширения газов.

Мы выведем также соотношение между принятой в быту шкалой Цельсия и абсолютной шкалой температур.

1. ТЕМПЕРАТУРА И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Субъективное восприятие температуры

В быту температуру понимают как «меру нагретости» тел: «горячие» тела имеют более высокую температуру, чем «холодные».

Однако такое представление о температуре весьма субъективно, так как даже одному и тому же человеку один и тот же предмет может одновременно казаться имеющим различные температуры. Чтобы убедиться в этом, поставьте следующий простой опыт. Опустите на несколько минут палец левой руки в стакан с холодной водой, а палец правой — в стакан с теплой водой. Затем одновременно опустите пальцы обеих рук в стакан с водой комнатной температуры.

Ваша левая рука «скажет» вам, что эта вода теплая, а правая — что *та же самая вода* холодная!

Итак, доверять субъективным ощущениям при определении температуры нельзя: надо определить температуру так, чтобы ее можно было измерять.

ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ И ТЕМПЕРАТУРА

Если привести в соприкосновение два тела — холодное и горячее, то холодное тело начнет нагреваться, а горячее — остывать. Температура каждого из этих тел будет изменяться до тех пор, пока их температуры не станут одинаковыми. Следовательно,

температура характеризует состояние теплового равновесия: тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковую температуру.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Практически все тела при нагревании расширяются. Это используют при создании *термометров* — приборов для измерения температуры. В быту часто используют жидкостные термометры (рис. 26.1).

Рис. 26.1. Жидкостный термометр

Чтобы расширение жидкости было более заметным, жидкость в термометре поднимается при расширении по очень тонкой трубке.



Шкала Цельсия

При определении температурной шкалы сначала выбирают две так называемые «опорные точки» — температуры, соответствующие двум явлениям, происходящим при определенных температурах (например, таяние льда и кипение воды при атмосферном давлении). Затем на трубке термометра наносят шкалу, деля расстояние между «опорными точками» на равные части. Например, по температурной шкале Цельсия¹ температуре таяния льда соответствует 0 градусов, а температуре кипения воды при атмосферном давлении соответствует 100 градусов. Температуру по шкале Цельсия обозначают *маленькой* буквой *t* и записывают, например, так: $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Какой термометр показывает «правильную» температуру?

Если на термометрах с различными жидкостями разделить шкалу между 0 °C и 100 °C на равные (по длине) части, то показания этих термометров при «промежуточных» температурах могут отличаться, потому что различные жидкости расширяются по-разному. Например, когда ртутный термометр при указанной разметке шкалы показывает 50 градусов, глицериновый покажет 47,6 градуса. И нет никаких доводов в пользу того, какой термометр считать «правильным»!

Еще сильнее будут различаться показания любого из этих термометров и водяного термометра. Дело в том, что вода при нагревании и охлаждении ведет себя довольно необычно: при нагревании от 0 °C до 4 °C она не расширяется, а *сжимается*². И поэтому показания водяного термометра при нагревании от 0 °C до 4 °C будут не увеличиваться, а *уменьшаться*!

По-разному расширяются при нагревании и твердые тела.

К счастью, выяснилось, что есть широкий круг веществ, которые при нагревании расширяются *одинаково*.

¹ Эта очень распространенная температурная шкала названа по имени шведского ученого Андерса Цельсия.

² Поэтому реки и озера в средних широтах не промерзают зимой до дна.

2. АБСОЛЮТНАЯ ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

В большом числе опытов было установлено, что все газы при нагревании расширяются одинаково.

Ниже мы выясним, чем обусловлено это сходство газов (см. § 28. *Температура и средняя кинетическая энергия молекул* и § 30. *Состояния вещества*), а сейчас отметим, что его можно использовать для более точного определения температуры¹.

ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР

Возьмем цилиндрический сосуд с газом, в котором газ нагревается при постоянном давлении, отметим на стенке сосуда «опорные точки», соответствующие 0 °С и 100 °С, а затем нанесем между ними метки на равных расстояниях друг от друга (рис. 26.2).

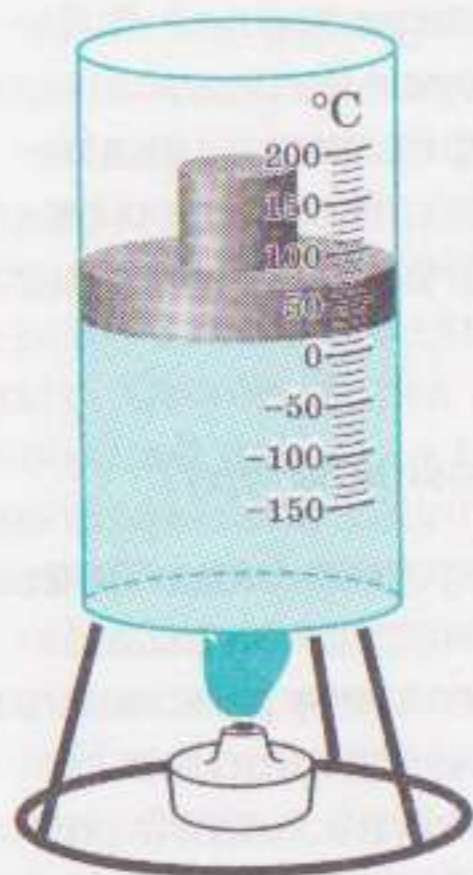


Рис. 26.2. Схема газового термометра

Газ расширяется при постоянном давлении. Соседние метки нанесены на равных расстояниях друг от друга.

Мы сделали, таким образом, газовый термометр, определив температуру как величину, которая линейно зависит от объема газа при постоянном давлении.

Ниже (см. § 28. *Температура и средняя кинетическая энергия молекул*) мы увидим, что определенная таким образом температура имеет глубокий физический смысл: она пропорциональна средней кинетической энергии молекул.

Отметим на шкале газового термометра опорные точки, соответствующие температурам 0 °С и 100 °С. Соотношение между объемом газа и температурой по шкале Цельсия в этом интервале температур показано на графике, приведенном на рис. 26.3, а.

¹ Для точного измерения температуры используют газовые термометры. Самый первый термометр был именно *газовым*! Изобрел его Галилей.

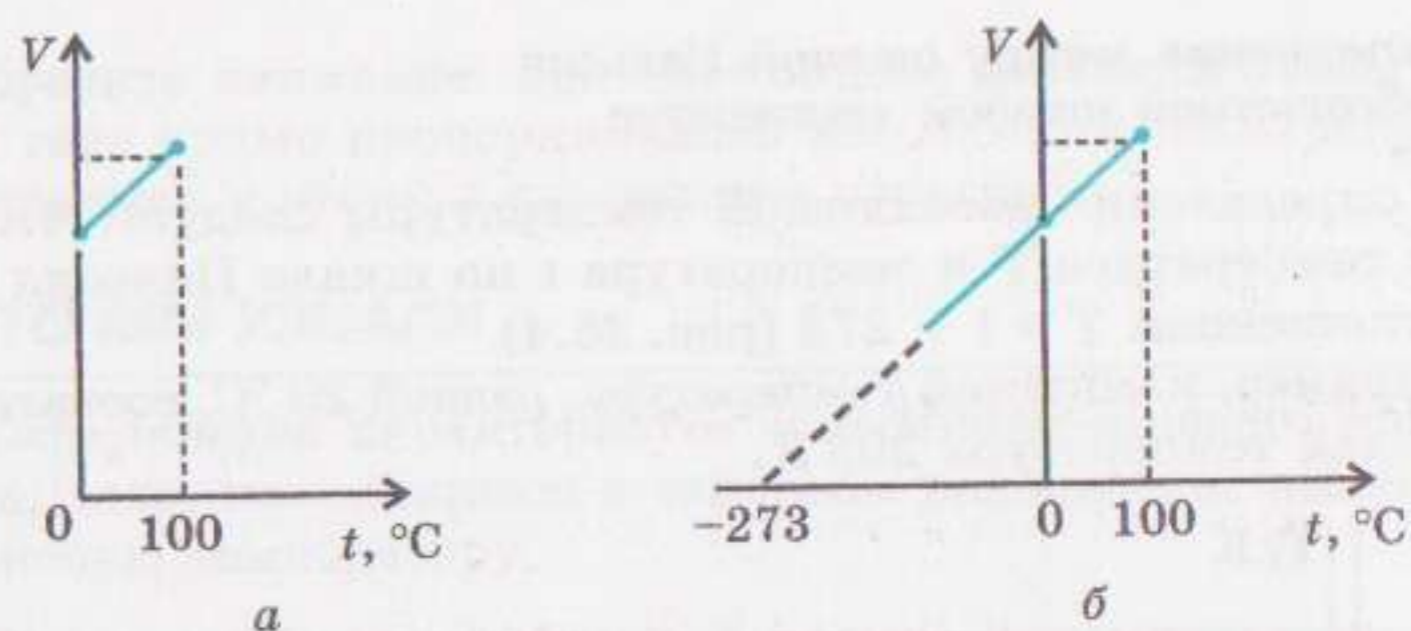


Рис. 26.3. Соотношение между объемом газа и температурой по шкале Цельсия

Если мы продлим этот график в сторону отрицательных температур, мы увидим, что объем газа должен был бы обратиться в нуль при $t = -273$ °С (рис. 26.3, б)!

На самом деле этого не происходит, поскольку при охлаждении до очень низких температур все газы превращаются сначала в жидкости, а затем — в твердые тела (поэтому участок графика в области низких температур намечен пунктиром).

Тем не менее, оказалось, что температура $t = -273$ °С действительно является «абсолютным холодом»: в следующем параграфе мы увидим, что такая температура соответствует «остановке» теплового движения молекул.

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

В середине 19-го века английский ученый Кельвин предложил новую шкалу температур, нуль которой соответствует «абсолютному холоду», то есть $t = -273$ °С, а изменение температуры в один градус равно изменению температуры в один градус по шкале Цельсия.

Эту шкалу температур называют *шкалой Кельвина* или *абсолютной шкалой*, а температуру, измеренную по этой шкале, — *абсолютной температурой*¹.

Нуль по абсолютной шкале температур называют *абсолютным нулем температуры*. Как уже говорилось, это самое низкое возможное значение абсолютной температуры.

Абсолютную температуру обозначают *большой буквой Т*.

Единицу абсолютной температуры называют *кельвин* и обозначают К.

При рассмотрении процессов, происходящих с газами, мы будем пользоваться в основном абсолютной температурой.

¹ Абсолютную шкалу температур называют также *термодинамической шкалой*, так как ее строгое определение дается в термодинамике.

Соотношение между шкалой Цельсия и абсолютной шкалой температур

Из определения абсолютной температуры следует, что абсолютная температура T и температура t по шкале Цельсия связаны соотношением $T = t + 273$ (рис. 26.4).

Например, комнатной температуре, равной $20\text{ }^\circ\text{C}$, соответствует абсолютная температура 293 K .

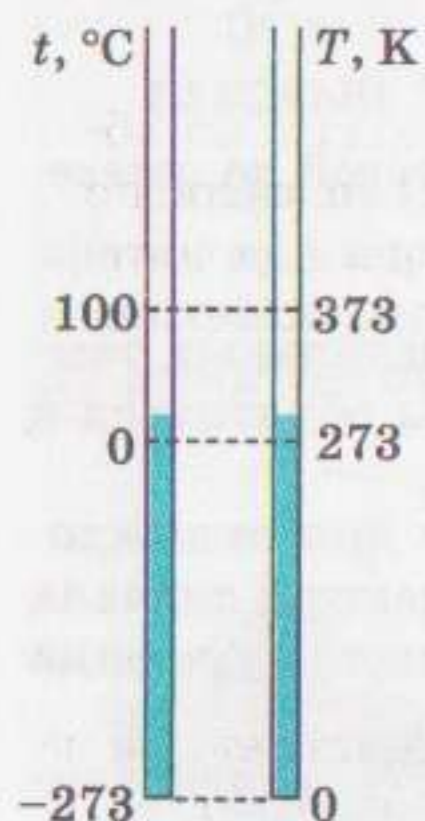


Рис. 26.4. Соотношение между шкалой Цельсия и абсолютной шкалой температур

Отмечены наиболее характерные точки: абсолютный нуль температуры, температура таяния льда и температура кипения воды при атмосферном давлении. Окрашенный столбик показывает комнатную температуру.

Соотношение между объемом газа и абсолютной температурой

Чтобы изобразить графически соотношение между объемом газа V и его абсолютной температурой T , достаточно сдвинуть шкалу температур на приведенном выше графике (см. рис. 26.3, б) на 273 градуса.

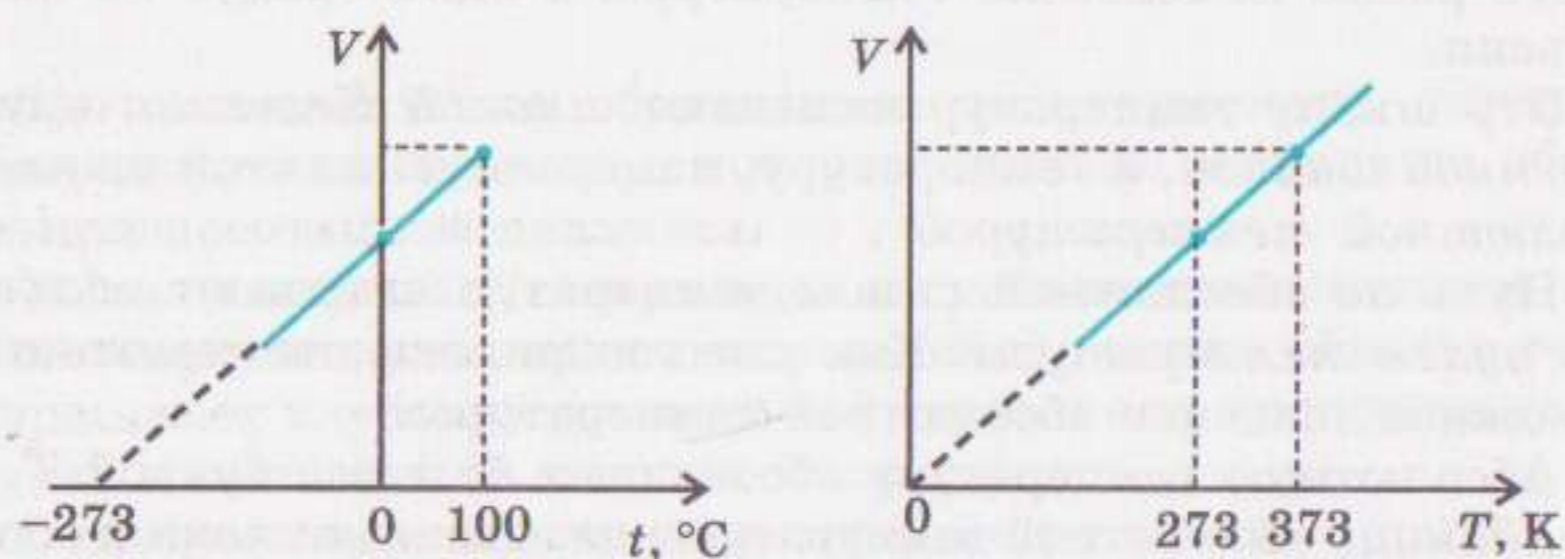


Рис. 26.5. Соотношение между объемом газа и его температурой по шкале Цельсия (слева) и по шкале Кельвина (справа)

Для наглядности оба графика — прежний, с температурой по шкале Цельсия, и новый, с температурой по шкале Кельвина, — приведены рядом на рис. 26.5.

Обратите внимание: при постоянном давлении объем данной массы газа прямо пропорционален абсолютной температуре. Мы еще вернемся к этому в следующем параграфе.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Температура** характеризует состояние теплового равновесия: тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковую температуру.
- **Абсолютной температурой** называют температуру по абсолютной шкале температур (шкале Кельвина), а нуль по этой шкале — **абсолютным нулем температуры**. Он соответствует $t = -273\text{ }^\circ\text{C}$ по шкале Цельсия. Абсолютную температуру обозначают T .

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему не всегда можно доверять определению температуры на ощупь? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
2. Тело А находится в тепловом равновесии с телом Б, а тело Б — с телом В. Что можно сказать о температурах тел А и В?
3. Как построена температурная шкала Цельсия?
4. Что такое абсолютная температура?
5. Чему равна абсолютная температура воздуха в комнате, если термометр на стене комнаты показывает $20\text{ }^\circ\text{C}$?
6. Температура воздуха увеличилась на $5\text{ }^\circ\text{C}$. На сколько кельвинов изменилась она при этом?
7. Каково соотношение между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия?
- 8*. Существует ли самая низкая температура? Если да, то чему она равна?
- 9*. Как связано понятие температуры с понятием теплового равновесия?
- 10*. При нагревании столбик жидкостного термометра в стеклянной трубке поднимается. Какой вывод отсюда можно сделать о расширении заполняющей термометр жидкости и стекла, из которого изготовлена трубка?
- 11*. Чем отличается расширение газов от расширения жидкостей и твердых тел?
- 12*. Изобразите графически, как связаны температура по шкале Цельсия с абсолютной температурой.
- 13*. При нагревании уровень жидкости в стеклянном сосуде понижается. Какая это может быть жидкость? В каком интервале температур жидкости проводили этот опыт?

§ 27. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

1. Изопроцессы
2. Уравнение состояния газа

Состояние данной массы газа определяется тремя макроскопическими параметрами — давлением, объемом и температурой. В этом параграфе мы изучим, как эти параметры связаны друг с другом.

Мы рассмотрим сначала процессы, в которых один из трех указанных параметров остается постоянным, а затем — процессы, в которых одновременно изменяются все три параметра, а также масса газа.

1. ИЗОПРОЦЕССЫ

Изучение газовых процессов началось с таких процессов, в которых один из трех параметров — давление p , объем V или температура T — остается постоянным, а два других изменяются.

Такие процессы называются *изопроцессами*¹.

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС (ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ)

Процесс, происходящий с данной массой газа при постоянном давлении, называется *изобарным*². При изобарном процессе изменяются температура и объем газа.

С изобарным процессом мы уже познакомились, изучая расширение газа при нагревании (см. § 26. Температура). Согласно определению абсолютной температуры

при изобарном процессе отношение объема данной массы газа к его абсолютной температуре остается постоянным: $\frac{V}{T} = \text{const}$ при $p = \text{const}$.

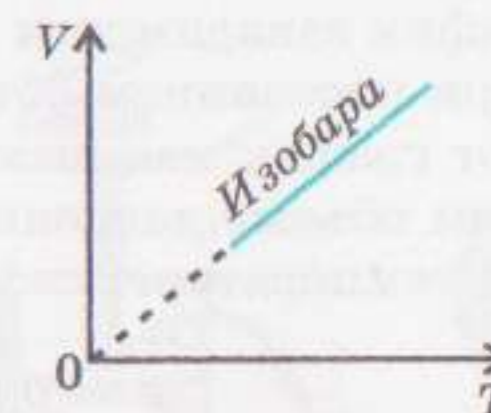
Это соотношение называется *законом Гей-Люссака* в честь французского ученого Ж. Гей-Люссака, исследовавшего изобарный процесс.

Соотношение между объемом данной массы газа и абсолютной температурой при постоянном давлении изображено графически на рис. 27.1. Этот график называется *изобарой*. Он показывает, что при постоянном давлении объем газа *прямо пропорционален* его абсолютной температуре.

¹ От греческого слова «изос» — равный.

² От греческих слов «изос» и «барос» — тяжесть. Сравните название изобарного процесса с названием прибора «барометр» для измерения давления.

Рис. 27.1. График зависимости $V(T)$ при $p = \text{const}$ (изобара)



Из закона Гей-Люссака следует, что для двух состояний (1 и 2) данной массы газа при постоянном давлении выполняется соотношение $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Например, если абсолютная температура увеличивается в 3 раза, объем газа увеличивается тоже в 3 раза.

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС (ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ)

Процесс, происходящий с данной массой газа при постоянном объеме, называют *изохорным*¹. При изохорном процессе изменяются температура и давление газа.

Поставим опыт

Воспользуемся установкой, изображенной на рис. 27.2.

Гофрированный цилиндрический сосуд, в котором заключена некоторая масса воздуха, соединяют с манометром (прибором для измерения давления) и помещают в сосуд с водой, которую можно нагревать.

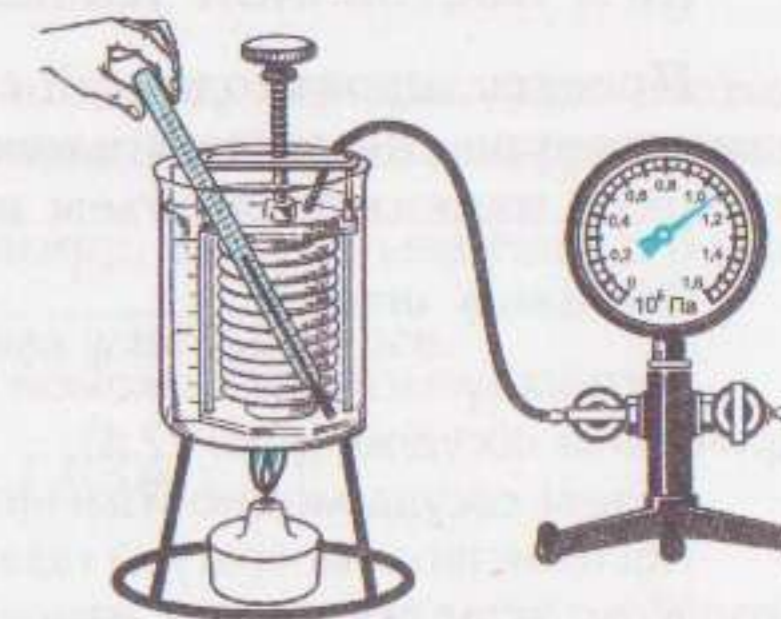


Рис. 27.2. Изучение зависимости давления данной массы газа от температуры при постоянном объеме

При нагревании газа его давление увеличивается.

Измеряя зависимость давления газа от абсолютной температуры при постоянном объеме, мы увидим, что

при изохорном процессе отношение давления данной массы газа к его абсолютной температуре остается постоянным: $\frac{P}{T} = \text{const}$ при $V = \text{const}$.

Это соотношение называют *законом Шарля*, так как зависимость давления газа от температуры была исследована в конце 18-го века французским ученым Ж. Шарлем.

¹ От греческих слов «изос» и «хора» — занимаемое место, пространство.

График зависимости давления данной массы газа от температуры при постоянном объеме изображен на рис. 27.3.

Этот график называют *изохорой*. Он показывает, что при постоянном объеме давление газа *прямо пропорционально* его абсолютной температуре.

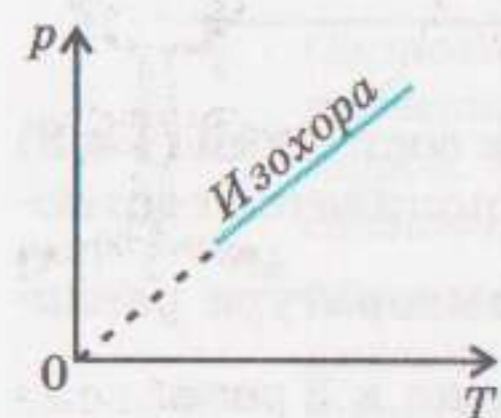


Рис. 27.3. График зависимости $p(T)$ при $V = \text{const}$ (изохора)

Из закона Шарля следует, что для двух состояний (1 и 2) данной массы газа при постоянном объеме выполняется соотношение

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Например, если абсолютная температура газа *увеличилась* в 2 раза, то давление газа *увеличилось* тоже в 2 раза.

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС (ПРИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ)

Процесс, происходящий с данной массой газа при постоянной температуре, называют *изотермическим*. При изотермическом процессе изменяются объем и давление газа.

Поставим опыт

Воспользуемся уже знакомой нам установкой с гофрированным цилиндрическим сосудом (рис. 27.4).

Объем сосуда можно изменять, поворачивая винт.

Постоянство температуры газа обеспечивается контактом с окружающим воздухом: если объем газа изменяется достаточно медленно, температура газа остается равной температуре окружающего воздуха.

Измеряя зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре, мы увидим, что

при изотермическом процессе произведение давления данной массы газа на его объем остается постоянным: $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$.

Это соотношение было установлено на опыте во второй половине 17-го века английским ученым Р. Бойлем и французским ученым Э. Мариоттом, поэтому его называют *законом Бойля — Мариотта*.

Рис. 27.4. Изучение зависимости давления данной массы газа от объема при постоянной температуре. При уменьшении объема газа давление увеличивается

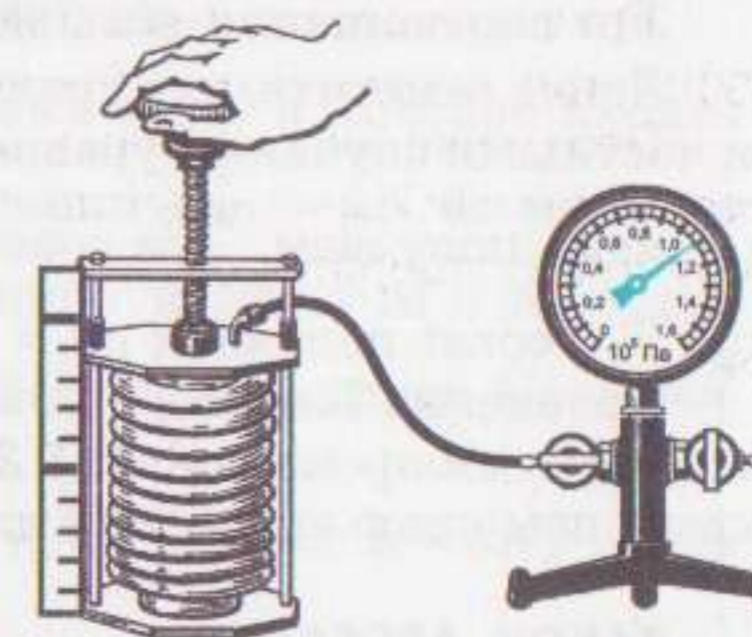


График зависимости давления данной массы газа от объема при постоянной температуре изображен на рис. 27.5.

Этот график называется *изотермой*. Он показывает, что при постоянной температуре давление газа *обратно пропорционально* его объему.

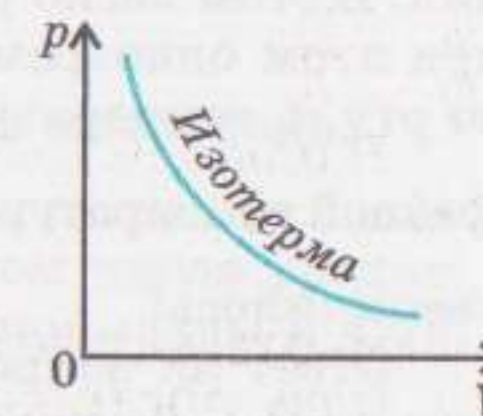


Рис. 27.5. График зависимости $p(V)$ при $T = \text{const}$ (изотерма)

Из закона Бойля — Мариотта следует, что для двух состояний (1 и 2) данной массы газа при постоянной температуре выполняется соотношение $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$. Например, если объем газа в 3 раза *увеличился*, то давление газа в 3 раза *уменьшилось*.

2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА

До сих пор мы рассматривали только такие газовые процессы, при которых один из трех параметров, характеризующих состояние данной массы газа (давление p , объем V или температура T), оставался неизменным. В общем же случае в ходе процесса могут *изменяться все три параметра* — p , V и T .

В первой половине 19-го века французский физик Клапейрон вывел соотношение, которое связывает эти параметры:

для данной массы газа произведение давления газа на его объем, деленное на абсолютную температуру газа, есть величина постоянная: $\frac{pV}{T} = \text{const}$.

Это соотношение называется *уравнением Клапейрона*.

Легко заметить, что уравнения всех трех изопроцессов являются частными случаями уравнения Клапейрона. Действительно, при $p = \text{const}$ получаем $\frac{V}{T} = \text{const}$; при $V = \text{const}$ получаем $\frac{p}{T} = \text{const}$; при $T = \text{const}$ получаем $pV = \text{const}$.

Уравнение Клапейрона можно вывести из уравнений для любых двух изопроцессов. В § 29 приведен вывод уравнения Клапейрона с помощью уравнений для изобарного и изохорного процессов.

ЗАКОН АВОГАДРО

Мы видели, что для процессов, происходящих с *данной* массой газа, значение выражения $\frac{pV}{T}$ постоянно. Если же масса газа в процессе изменяется, то изменяется и значение этого выражения. В этом легко убедиться на собственном опыте. Надуйте щеки: при этом одновременно увеличатся и давление, и объем воздуха во рту, а температура воздуха останется практически неизменной (равной температуре тела). Следовательно, значение выражения $\frac{pV}{T}$ увеличилось!

Ответ на вопрос, от чего зависит значение этого выражения, дает закон, установленный А. Авогадро в начале 19-го века опытным путем:

при одинаковых температуре и давлении в равных объемах различных газов содержится одинаковое количество молекул.

Из закона Авогадро следует, что $\frac{pV}{T} = kN$, где коэффициент пропорциональности k для всех газов *одинаков*. Его назвали *постоянной Больцмана* в честь австрийского физика, одного из создателей молекулярно-кинетической теории. Измерения показали, что $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Физический смысл постоянной Больцмана обсуждается в § 28. *Температура и средняя кинетическая энергия молекул.*

Из уравнения $\frac{pV}{T} = kN$ следует, что давление газа можно очень просто выразить через концентрацию газа $n = \frac{N}{V}$ и его абсолютную температуру. Мы получим $p = \frac{N}{V} kT = nkT$.

Соотношение $p = nkT$ понадобится нам в следующем параграфе при выводе соотношения между абсолютной температурой и средней кинетической энергией молекул.

УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА — КЛАПЕЙРОНА

Чтобы вывести уравнение состояния газа, в которое входит также масса газа, выразим в соотношении $\frac{pV}{T} = kN$ количество молекул N через массу газа m и его молярную массу M с помощью соотношения $N = \frac{m}{M} N_A$ (см. § 25. *Количество вещества. Постоянная Авогадро*). Мы получим $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} kN_A = \frac{m}{M} R$, где $R = kN_A$ — так называемая *универсальная газовая постоянная*: $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Полученное соотношение называют *уравнением Менделеева — Клапейрона*, так как оно впервые было выведено российским ученым Д. И. Менделеевым во второй половине 19-го века. Его записывают обычно в виде

$$pV = \frac{m}{M} RT, \text{ где } m \text{ и } M \text{ — масса и молярная масса газа.}$$

Примеры применения газовых законов, в том числе уравнений Клапейрона и Менделеева — Клапейрона, приведены в § 29.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Изопроцессы*: для данной массы газа $\frac{V}{T} = \text{const}$ при $p = \text{const}$ (*изобарный* процесс); $\frac{p}{T} = \text{const}$ при $V = \text{const}$ (*изохорный* процесс); $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$ (*изотермический* процесс).
- *Уравнение Клапейрона*: для данной массы газа $\frac{pV}{T} = \text{const}$.
- *Закон Авогадро*: при одинаковых температуре и давлении в равных объемах различных газов содержится одинаковое количество молекул. Следствиями уравнения Клапейрона и закона Авогадро являются соотношения $\frac{pV}{T} = kN$ и $p = nkT$, где k — постоянная Больцмана: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.
- *Уравнение Менделеева — Клапейрона*: $pV = \frac{m}{M} RT$, где m — масса газа, M — его молярная масса, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — универсальная газовая постоянная.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какой процесс называют изобарным? Как связаны объем газа и его абсолютная температура при изобарном процессе? Запишите соответствующую формулу и изобразите график этого процесса.
2. Какой процесс называют изохорным? Как связаны давление газа и его абсолютная температура при изохорном процессе? Запишите соответствующую формулу и изобразите график этого процесса.
3. Какой процесс называют изотермическим? Как связаны давление газа и его объем при изотермическом процессе? Запишите соответствующую формулу и изобразите график этого процесса.
4. Каково соотношение между давлением, объемом и температурой для данной массы газа? Как называют это соотношение?
5. Сформулируйте закон Авогадро.
6. Запишите уравнение Менделеева — Клапейрона. Какие величины входят в это уравнение?
- 7*. Абсолютная температура газа увеличилась в 2 раза, а его объем увеличился при этом в 3 раза. Изменилось ли при этом давление газа? Если да, то во сколько раз?
- 8*. Абсолютная температура газа уменьшилась в 2 раза, а его давление уменьшилось при этом в 1,5 раза. Изменился ли при этом объем газа? Если да, то во сколько раз?
- 9*. Давление газа увеличилось в 3 раза, а его объем уменьшился при этом в 3 раза. Изменилась ли при этом температура газа? Если да, то как?
- 10*. Как связаны постоянная Больцмана, постоянная Авогадро и универсальная газовая постоянная?

§ 28. ТЕМПЕРАТУРА И СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории
2. Абсолютная температура и средняя кинетическая энергия молекул
3. Скорости молекул

В этом параграфе мы расскажем, как молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства газов, рассмотренные в предыдущих параграфах.

При этом прояснится физический смысл абсолютной температуры: мы увидим, что она пропорциональна средней кинетической энергии молекул.

1. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Рассмотрим простейшее состояние вещества — газ, в котором взаимодействием молекул между их столкновениями можно пренебречь. Это справедливо в том случае, когда расстояния между молекулами намного превышают размеры самих молекул.

Модель реального газа, в которой пренебрегают размерами молекул газа и их взаимодействием между столкновениями, называют идеальным газом.

Сравнение выводов молекулярно-кинетической теории идеального газа с опытом показывает, что разреженный газ (например, окружающий нас воздух) с хорошей точностью можно считать идеальным газом.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Как уже говорилось, давление газа обусловлено ударами молекул. Убедимся на опыте в том, что частые удары небольших частиц создают постоянную силу давления.

Если сыпать на лист тонкого картона песок равномерным потоком, то лист постоянно будет находиться в согнутом положении, как если бы на него действовала *постоянная* сила, хотя деформация картона обусловлена *отдельными ударами* песчинок (рис. 28.1).

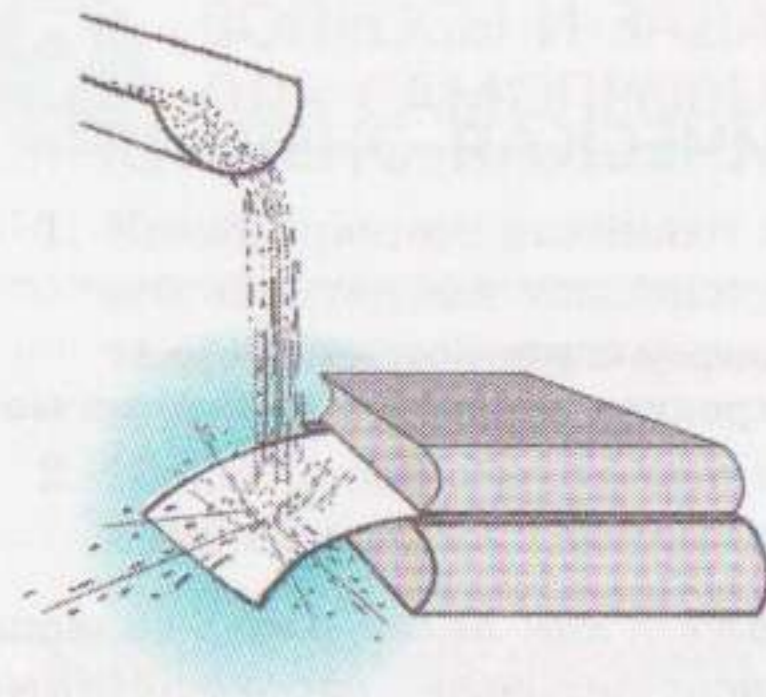


Рис. 28.1. Демонстрация возникновения постоянной силы давления

Частые удары небольших частиц создают постоянную силу давления.

В середине 19-го века немецкий физик Рудольф Клаузиус, исходя из предположения, что давление газа создается ударами молекул, вывел соотношение, которое связывает давление газа p с концентрацией молекул n , массой молекулы m_0 и средним значением квадрата скорости молекулы $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$. Это соотношение называется

основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа и имеет вид $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$.

Поскольку средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы $\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно записать также в виде $p = \frac{2}{3} n \overline{E}$.

Значение основного уравнения молекулярно-кинетической теории состоит в том, что оно выражает *макроскопический* параметр (давление газа) через *микроскопические* параметры — концентрацию молекул, массу молекулы и средний квадрат скорости (или среднюю кинетическую энергию) молекул.

О выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории

Вывод этого уравнения является довольно громоздким. Так как в дальнейшем нам понадобятся только следствия из этого уравнения, мы ограничимся здесь качественными соображениями, на которых основан его вывод.

Сила давления газа на стенку сосуда пропорциональна импульсу, который каждую секунду передается стенке молекулами при ударах о стенку (если бы стенка не удерживалась внешними силами, сила давления газа привела бы ее в движение).

Примем для простоты, что все молекулы газа движутся с одинаковой скоростью, модуль которой равен v . Передаваемый каждую секунду молекулами стенке импульс пропорционален частоте ударов (которая пропорциональна произведению концентрации молекул на их скорость, то есть nv) и импульсу молекулы $m_0 v$. Следовательно, давление газа должно быть пропорционально выражению $nm_0 v^2$. Численный коэффициент $\frac{1}{3}$ обусловлен трехмерностью пространства и тем, что при хаотическом движении все направления скорости молекул равновероятны.

2. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

Найдем теперь соотношение между средней кинетической энергией поступательного движения молекул \overline{E} и абсолютной температурой газа T .

Сравним для этого два выражения для давления: основное уравнение молекулярно-кинетической теории, записанное в виде $p = \frac{2}{3} n \overline{E}$, и уравнение состояния идеального газа, записанное в виде $p = nkT$ (см. § 27. Газовые законы).

Левые части этих выражений равны. Приравнивая их правые части, получаем, что

средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул \overline{E} связана с абсолютной температурой T соотношением $\overline{E} = \frac{3}{2} kT$, где k — постоянная Больцмана.

Полученное соотношение раскрывает физический смысл абсолютной температуры: мы видим, что *абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии движения молекул*.

СУММАРНАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Суммарная энергия молекул одноатомного газа — это только кинетическая энергия поступательного хаотического движения молекул. Поэтому суммарная энергия всех молекул газа $U = N \overline{E}$. Подставляя сюда выражения $N = \nu N_A$ и $\overline{E} = \frac{3}{2} kT$, получаем $U = \nu N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \nu N_A kT = \frac{3}{2} \nu RT$.

Итак, энергия газа зависит только от *температуры* и *количества вещества*.

Молекулы многоатомных газов обладают не только кинетической энергией поступательного движения, но еще и кинетической энергией вращательного движения, поэтому суммарная кинетическая энергия молекул таких газов больше, чем $\left(\frac{3}{2}\right)vRT$.

Расчеты показывают, что суммарная энергия молекул двухатомного газа $U = \left(\frac{5}{2}\right)vRT$, а для газа, молекулы которого содержат три или более атомов, $U = 3vRT$.

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА

Температура, как мы сейчас увидели, является энергетической характеристикой, поэтому ее можно было бы измерять в джоулях, как среднюю кинетическую энергию молекул. Однако задолго до того, как был раскрыт физический смысл температуры, ее начали измерять в градусах. И сегодня в разделах науки и техники, связанных с тепловыми явлениями, используют как джоуль, так и градус. А «переводным множителем» между ними, согласно формуле $\bar{E} = \left(\frac{3}{2}\right)kT$, является постоянная Больцмана: в этом и состоит ее физический смысл.

3. СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ

С помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории скорость молекул газа можно выразить через его абсолютную температуру T и молярную массу M .

В § 29. Примеры решения задач по молекулярной физике доказано, что $v_{\text{ср кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$, где $v_{\text{ср кв}} = \sqrt{v^2}$ — так называемая *средняя квадратичная скорость*, которую можно использовать для оценки среднего значения модуля скорости молекул.

Из формулы $v_{\text{ср кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ следует, что при одной и той же температуре молекулы более «легкого» газа (с менее массивными молекулами и, значит, с меньшей молярной массой) движутся с большими скоростями. Например, средняя скорость молекул водорода в 4 раза больше средней скорости молекул кислорода.

Пример

Оценим, пользуясь приведенной формулой, скорость молекул в воздухе при комнатной температуре.

Воздух состоит в основном из молекул азота и кислорода, для которых $M = 30 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а комнатная температура $t = 20$ °С, что соответствует

$T \approx 300$ К. Пользуясь приведенной выше формулой, получаем $v_{\text{ср кв}} \approx 500$ м/с. Скорость же молекул водорода при комнатной температуре составляет около 2 км/с! Так что молекулы действительно движутся со скоростями артиллерийских снарядов!

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МОЛЕКУЛ

Скорости молекул, предсказываемые молекулярно-кинетической теорией, даже в конце 19-го века казались некоторым ученым неправдоподобно большими, что было одним из главных возражений против этой теории.

Одно из первых измерений скоростей молекул выполнил немецкий физик Отто Штерн в начале 20-го века. Вот как был поставлен этот опыт.

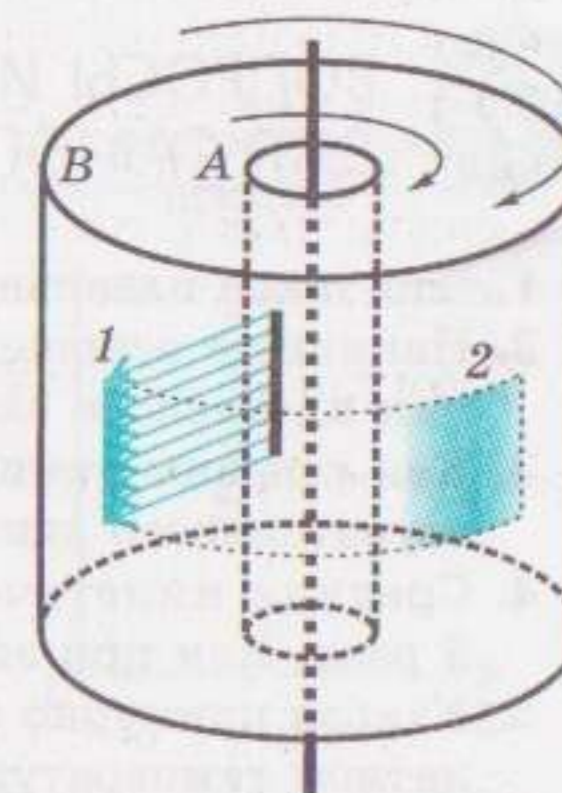


Рис. 28.2. Схема опыта Штерна по измерению скоростей молекул

Пока молекулы пролетают от цилиндра A до цилиндра B, соединенные цилиндры успевают повернуться на некоторый угол.

Вдоль общей оси двух жестко соединенных цилиндров A и B располагалась покрытая серебром проволока, которую нагревали электрическим током (рис. 28.2). Атомы серебра испарялись с поверхности проволоки и, пролетая через узкую щель в цилиндре A, осаждались в виде узкой светлой полосы 1 на внутренней поверхности цилиндра B.

Затем соединенные вместе цилиндры приводили в быстрое вращение вокруг оси (направление вращения показано на рисунке стрелками). При этом полоса 1 смещалась и расширялась, превращаясь в полосу 2 (см. рис. 28.2). Смещение полосы обусловлено тем, что за то время, пока атомы серебра пролетают от цилиндра A до цилиндра B, эти цилиндры успевают повернуться на некоторый угол. Зная радиусы цилиндров и частоту их вращения, можно по величине смещения полосы рассчитать скорость атомов серебра. Расширение же полосы обусловлено тем, что при «тепловом» движении атомы движутся с различными скоростями.

Результаты опыта Штерна подтвердили предсказания молекулярно-кинетической теории.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Идеальным газом** называют модель реального газа, в которой пренебрегают размерами молекул газа и их взаимодействием между столкновениями.

- **Основное уравнение молекулярно-кинетической теории:**

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}. \text{ Его можно записать также в виде } p = \frac{2}{3} n \overline{E}.$$

- **Абсолютная температура** является мерой средней кинетической энергии движения молекул: $\overline{E} = \frac{3}{2} kT$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое идеальный газ?
2. Напишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.
3. Как связаны температура и средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул?
4. Средняя кинетическая энергия молекул газа увеличилась в 2 раза. Как при этом изменилась температура газа?
5. Какова примерно средняя скорость молекул в воздухе при комнатной температуре?
- 6*. В каких случаях реальный газ близок по своим свойствам к идеальному газу?
- 7*. Что такое среднее значение квадрата скорости молекул?
- 8*. В чем состоит физический смысл постоянной Больцмана?
- 9*. От чего зависит и от чего не зависит суммарная энергия молекул газа?
- 10*. Оцените суммарную кинетическую энергию молекул воздуха в комнате, в которой вы находитесь, и сравните ее с работой, которую нужно совершить для подъема человека на 12-й этаж.
- 11*. Как выражается средняя квадратичная скорость молекул через абсолютную температуру газа и его молярную массу?
- 12*. Как была измерена скорость молекул?

§ 29. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

1. Графики газовых законов
2. Уравнение состояния газа
3. Скорость и энергия молекул

1. ГРАФИКИ ГАЗОВЫХ ЗАКОНОВ

Задача 1. ГРАФИКИ ИЗОПРОЦЕССОВ

Постройте графики всех изопроцессов в координатах (V, T) , (p, T) , (p, V) .

Решение (рис. 29.1)

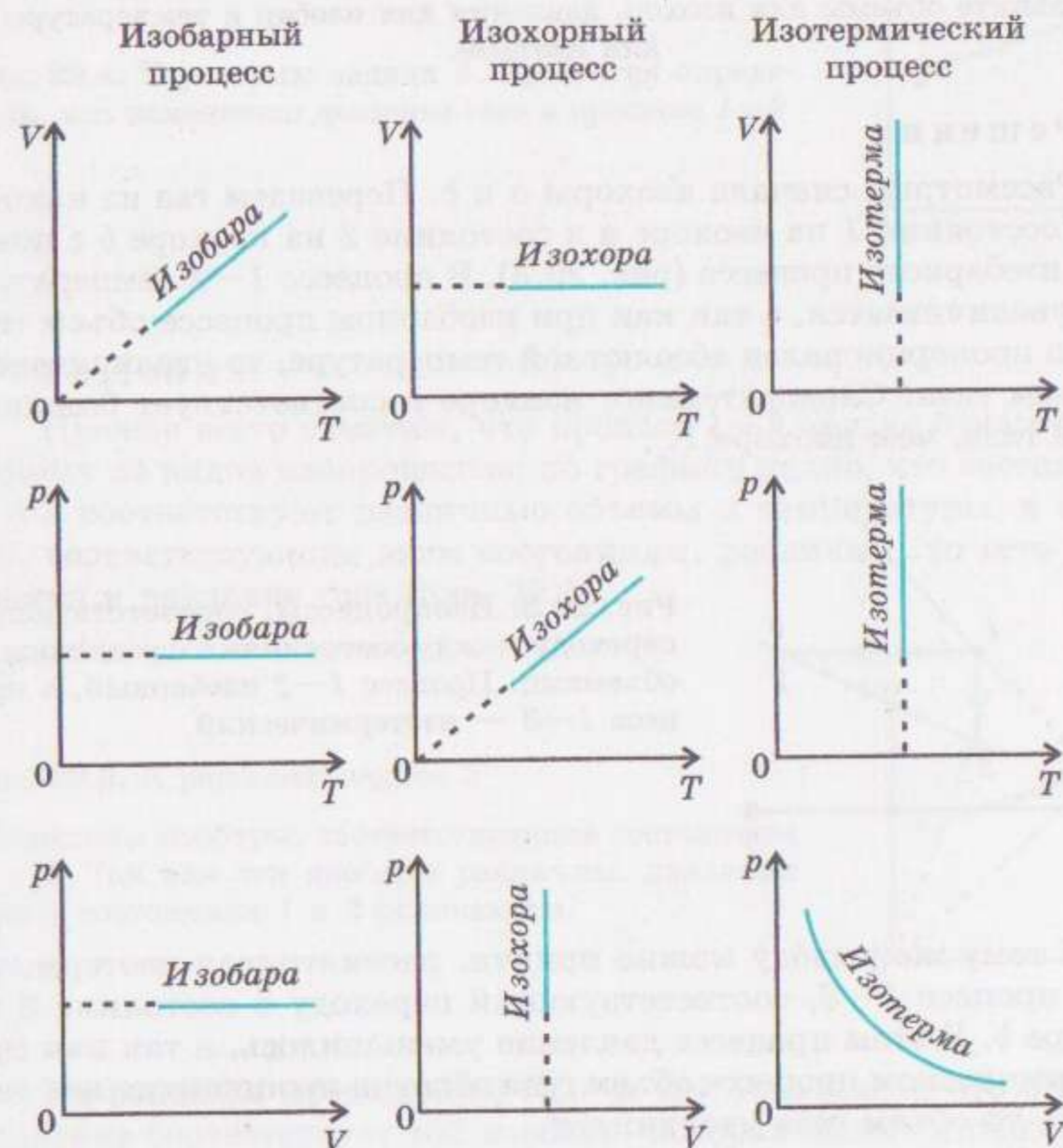


Рис. 29.1. Графики изопроцессов

Задача 2. СРАВНЕНИЕ ИЗОХОР, ИЗОБАР И ИЗОТЕРМ

На рис. 29.2 изображены две изохоры (a и b), две изобары (c и d) и две изотермы (e и f). Какой изохоре соответствует больший объем, какой изобаре — большее давление и какой изотерме — большая температура?

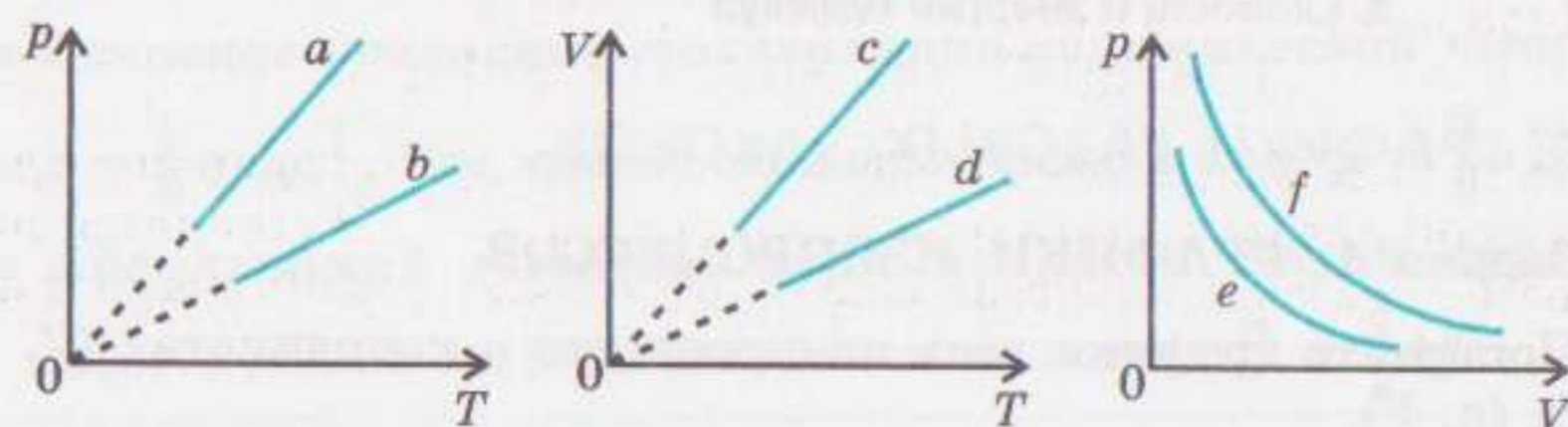


Рис. 29.2. Две изохоры, две изобары и две изотермы

Сравните объемы для изохор, давления для изобар и температуры для изотерм.

Решение

Рассмотрим сначала изохоры a и b . Переведем газ из какого-либо состояния 1 на изохоре a в состояние 2 на изохоре b с помощью изобарного процесса (рис. 29.3). В процессе $1-2$ температура газа увеличивается, а так как при изобарном процессе объем газа прямо пропорционален абсолютной температуре, то увеличивается и объем газа. Следовательно, изохоре b соответствует больший объем газа, чем изохоре 1 .

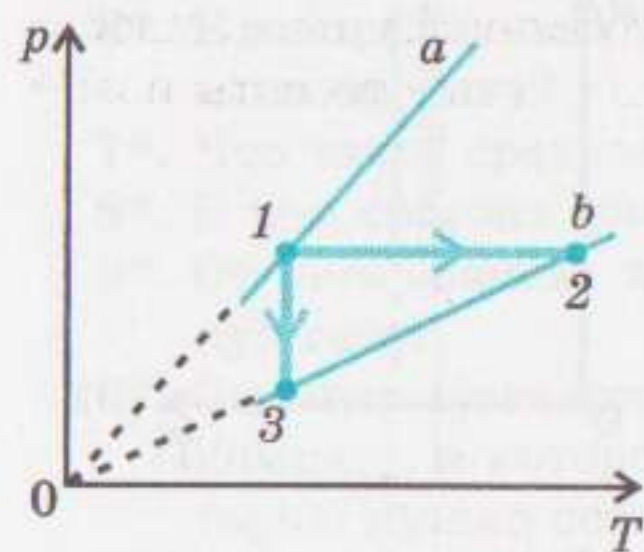


Рис. 29.3. Изопроцессы, соответствующие переходу между состояниями с различными объемами. Процесс $1-2$ изобарный, а процесс $1-3$ — изотермический

К тому же выводу можно прийти, рассматривая изотермический процесс $1-3$, соответствующий переходу в состояние 3 на изобаре b . В этом процессе давление уменьшилось, а так как при изотермическом процессе объем газа обратно пропорционален давлению, то объем газа увеличился.

Таким образом, изобаре b , лежащей ниже изобары a , соответствует больший объем.

Рассуждая аналогично, можно сравнить давления для двух изобар и температуры для двух изотерм. Мы получим, что изобаре d , лежащей ниже изобары c , соответствует больший объем, а изотерме f , лежащей выше изотермы e , соответствует большая температура.

Задача 3. СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДВУХ СОСТОЯНИЙ ГАЗА

На рис. 29.4 приведен график процесса, происходящего с данной массой идеального газа, в координатах V, T . Изменяется ли в процессе $1-2$ давление газа и если да, то как: увеличивается или уменьшается?

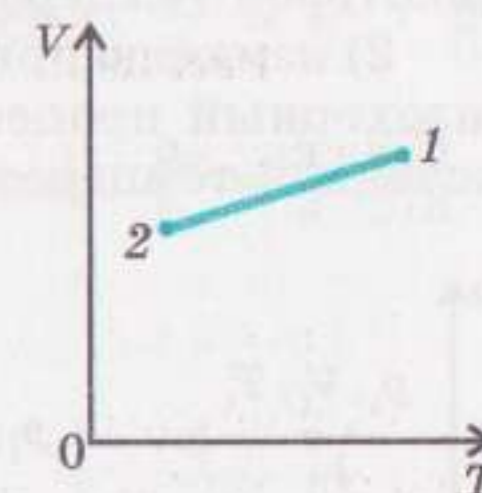


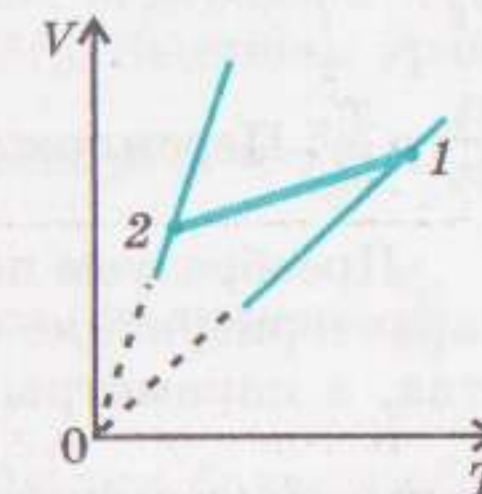
Рис. 29.4. К условию задачи 3. Требуется определить, как изменяется давление газа в процессе $1-2$

Решение

Прежде всего заметим, что процесс $1-2$ нельзя отнести ни к одному из видов изопроцессов: по графику видно, что состояниям 1 и 2 соответствуют различные объемы и температуры, а изобары, соответствующие этим состояниям, различны, то есть изменяется и давление газа (рис. 29.5).

Рис. 29.5. К решению задачи 3

Проведены изобары, соответствующие состояниям 1 и 2 . Так как эти изобары различны, давления газа в состояниях 1 и 2 отличаются.



Из решения предыдущей задачи мы уже знаем, что большее давление соответствует той изобаре, которая лежит ниже. Следовательно, давление в состоянии 1 больше, чем в состоянии 2 . Итак, в процессе $1-2$ давление газа уменьшается.

2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Задача 4. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ КЛАПЕЙРОНА

Выведите уравнение Клапейрона $\frac{pV}{T} = \text{const}$, считая, что переход газа из состояния с параметрами p_1, V_1, T_1 в состояние с параметрами p_2, V_2, T_2 осуществляется с помощью двух последовательных изопроцессов — изобарного и изохорного.

Решение

1) Изменим при постоянном давлении p_1 объем газа от V_1 до V_2 , (изобарный процесс); при этом температура газа станет равной некоторой температуре T' (рис. 29.6);

2) изменим при постоянном объеме V_2 давление газа от p_1 до p_2 (изохорный процесс); при этом температура газа станет равной конечной температуре T_2 (см. рис. 29.6).

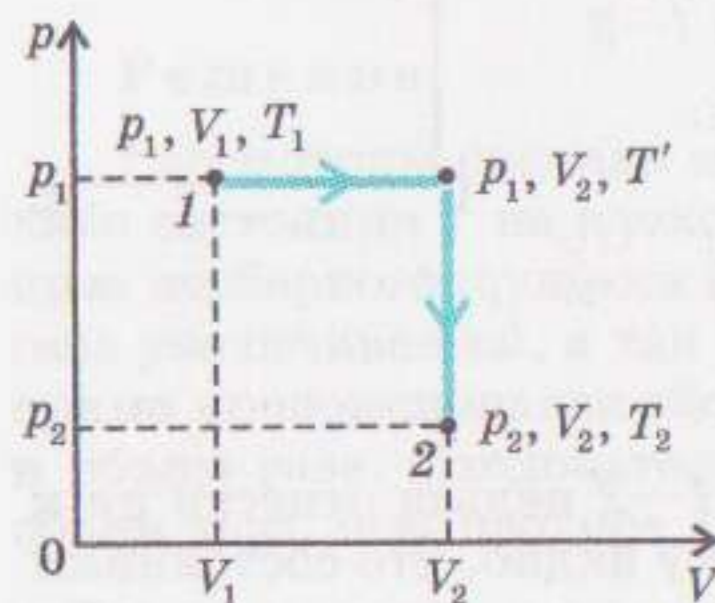


Рис. 29.6. К выводу уравнения Клапейрона. Переход газа из состояния с параметрами p_1, V_1, T_1 в состояние с параметрами p_2, V_2, T_2 осуществляется с помощью изобарного и изохорного процессов

Для первого процесса (изобарного) выполняется соотношение $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T'}$, а для второго (изохорного) выполняется соотношение

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T'}{T_2}. \text{ Перемножая эти соотношения, получаем } \frac{V_1 p_1}{V_2 p_2} = \frac{T_1 T'}{T' T_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Преобразуем полученное соотношение так, чтобы параметры, характеризующие состояние 1, находились в левой части равенства, а параметры, характеризующие состояние 2, — в правой части. Мы получим $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$. Из того, что это соотношение справедливо для двух произвольных состояний 1 и 2 данной массы газа с параметрами p_1, V_1, T_1 и p_2, V_2, T_2 , следует, что для данной массы газа значение выражения $\frac{pV}{T}$ постоянно.

Задача 5. ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ КЛАПЕЙРОНА

Гофрированный герметически закрытый сосуд с газом перенесли из смеси воды со льдом в кипящую воду. При этом объем газа увеличили в полтора раза. Увеличилось или уменьшилось давление газа? На сколько процентов изменилось давление?

Решение

Обозначим начальные параметры газа p_1, V_1, T_1 , а конечные параметры p_2, V_2, T_2 . Начальная температура газа¹ равна 0°C , что соответствует 273 K , а конечная температура равна 100°C , что соответствует 373 K . По условию масса газа не изменяется (сосуд герметически закрыт), поэтому $\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$. Отсюда $\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}$.

Согласно условию $\frac{V_1}{V_2} = \frac{2}{3}$, $\frac{T_2}{T_1} = \frac{373}{273}$. Следовательно, $\frac{p_2}{p_1} = \frac{2 \cdot 373}{3 \cdot 273} = 0,91$.

Итак, давление газа уменьшилось на 9%.

Задача 6. ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ МЕНДЕЛЕЕВА — КЛАПЕЙРОНА

Цилиндрический сосуд разделен подвижным поршнем на две части: в одной части находится водород, а в другой — кислород. Какую часть сосуда занимает каждый из газов, если давления, температуры и массы газов равны?

Решение

Обозначим давление газов p , температуру газов T , а массу каждого из газов m . Объемы и молярные массы водорода и кислорода обозначим соответственно V_{H} , M_{H} и V_{O} , M_{O} . Запишем уравнения Менделеева — Клапейрона для этих газов: $pV_{\text{H}} = \frac{m}{M_{\text{H}}}RT$ и $pV_{\text{O}} = \frac{m}{M_{\text{O}}}RT$. Деля первое уравнение на второе, получаем $\frac{V_{\text{H}}}{V_{\text{O}}} = \frac{M_{\text{O}}}{M_{\text{H}}} = 16$. Следовательно, объем водорода в 16 раз больше объема кислорода.

¹ Одной из наиболее распространенных ошибок при решении задач на газовые процессы является то, что температуру, заданную в условии задачи по шкале Цельсия, забывают перевести в абсолютную шкалу температур.

Таким образом, при одинаковых массе, давлении и температуре газов водород занимает $\frac{16}{17}$ объема сосуда, а кислород — только $\frac{1}{17}$. Обусловлено это «неравенство» тем, что при одинаковой массе газов количество молекул водорода в 16 раз больше, чем количество молекул кислорода. Эта задача — наглядная иллюстрация того, что многие свойства газов определяются не массой, а количеством молекул!

3. СКОРОСТЬ И ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

Задача 7. СРЕДНЕКВАДРАТИЧНАЯ СКОРОСТЬ МОЛЕКУЛ

Выразите среднюю квадратичную скорость молекул газа $v_{\text{ср кв}} = \sqrt{\overline{v^2}}$ через молярную массу газа M и его абсолютную температуру T .

Решение

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$, с учетом того, что $n = \frac{N}{V}$ и $N m_0 = m$, получаем $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{N m_0}{V} \overline{v^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \overline{v^2}$, откуда $pV = \frac{1}{3} m \overline{v^2}$. Сравнивая эту формулу с уравнением Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{M} RT$, получаем $\overline{v^2} = \frac{3RT}{M}$.

Следовательно, $v_{\text{ср кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$.

Задача 8. СУММАРНАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Оцените суммарную кинетическую энергию поступательного движения молекул, находящихся в воздухе классной комнаты. Увеличивается ли эта энергия при включении отопления?

Решение

Суммарная кинетическая энергия поступательного движения молекул $E_k = N\bar{E}$, где N — количество молекул в комнате, \bar{E} — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории, записанного в виде $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$, следует, что $\bar{E} = \frac{3p}{2n} = \frac{3}{2} \frac{pV}{N}$.

Отсюда $E_k = N\bar{E} = \frac{3}{2} pV$.

Атмосферное давление p равно примерно 10^5 Па, объем классной комнаты V примем для оценки равным 200 м^3 . Подставляя эти числовые данные в формулу для E_k , получим $E_k = 3 \cdot 10^7$ (Дж).

Для сравнения: такую энергию надо затратить, чтобы поднять слона массой 3 т на километровую высоту! А ведь эту огромную энергию мы практически не замечаем, считая воздух «почти пустотой».

Впрочем, полученный ответ не так уж удивителен, если вспомнить, что молекулы движутся со скоростями в сотни метров в секунду.

При включении отопления объем V воздуха в комнате остается неизменным, а давление p остается равным давлению на улице¹. Следовательно, остается неизменным и произведение pV . Но тогда согласно формуле $E_k = \frac{3}{2} pV$ остается неизменной и суммарная энергия всех молекул, находящихся в воздухе классной комнаты!

Почему же тогда при включении отопления в комнате становится теплее? Вспомним, что температура определяется не суммарной энергией всех молекул, а *средней* энергией молекул. При столкновении с горячей поверхностью отопительных приборов молекулы газов, входящих в состав воздуха, «разгоняются», и хотя часть молекул после этого улетает через щели или форточки, оставшиеся в комнате молекулы начинают двигаться быстрее. В результате температура воздуха в комнате повышается.

Таким образом, зимой все отопительные приборы отапливают не только помещения, но и «улицу». Вот почему в крупных городах температура зимой на 1—2 градуса выше, чем за городом (особенно это заметно при температурах, близких к 0 °С: в городе снег тает, а за городом лежит).

¹ Даже очень малая разность давлений воздуха между комнатой и улицей выдвигала бы оконные стекла. Выравнивание давлений происходит очень быстро через щели, форточки и т. п.

§ 30. СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

1. Сравнение газов, жидкостей и твердых тел
2. Кристаллы, аморфные тела и жидкости
3. Другие состояния вещества

В этом параграфе мы рассмотрим строение твердых тел и жидкостей.

Мы расскажем также о веществах, промежуточных по своим свойствам между кристаллами и жидкостями — жидких кристаллах, о плазме — наиболее распространенном состоянии вещества во Вселенной, а также о молекулярном строении живых организмов.

1. СРАВНЕНИЕ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Из курса физики основной школы вы уже знаете, что:

- твердые тела сохраняют объем и форму;
- жидкости сохраняют объем, но не сохраняют форму: вследствие текучести жидкость обычно принимает форму сосуда¹;
- газы не сохраняют ни объем, ни форму: газ заполняет весь сосуд, в котором он находится.

Свойства газов мы рассмотрели выше. Рассмотрим теперь свойства твердых тел и жидкостей.

МОЖЕТ ЛИ ОДНО И ТО ЖЕ ВЕЩЕСТВО НАХОДИТЬСЯ В РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЯХ?

Мы привыкли к тому, что вода может существовать в трех состояниях — твердом (лед), жидком (собственно вода) и газообразном (пар). Большинство же других веществ мы считаем «изначально» твердыми, жидкими или газообразными — например, железо мы считаем твердым телом, а водород — газом.

Однако железо может быть и жидким, и газообразным, а водород — и жидким, и твердым: при температуре 1539 °С железо плавится, а при 3200 °С закипает, превращаясь в газ; водород при температуре -253 °С сжижается, а при -259 °С отвердевает.

¹ Но не всегда: например, маленькие капельки имеют шарообразную форму. Это будет объяснено в разделе «Жидкости» этого параграфа.

Сегодня установлено, что любое вещество может находиться в любом из трех агрегатных состояний — твердом, жидком или газообразном: это зависит от условий, в которых это вещество находится (от температуры и давления).

ПОЧЕМУ СВОЙСТВА ВСЕХ ГАЗОВ ПОЧТИ ОДИНАКОВЫ, А СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫ?

Молекулы газов взаимодействуют только при сравнительно редких столкновениях. Поэтому свойства газов определяются в основном движением молекул, которое во всех газах одинаково: между столкновениями молекулы движутся равномерно и прямолинейно. Вот почему свойства различных газов так сходны.

Свойства же твердых тел и жидкостей определяются в основном взаимодействием атомов и молекул. А поскольку атомы и молекулы различных веществ взаимодействуют по-разному, то и свойства жидкостей и твердых тел чрезвычайно разнообразны.

КАК РАСПОЛОЖЕНЫ МОЛЕКУЛЫ И АТОМЫ В ГАЗАХ, ЖИДКОСТЯХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ?

В газах молекулы находятся в среднем на расстояниях, намного превышающих размеры самих молекул. Например, в воздухе расстояние между молекулами примерно в 10 раз больше размеров молекул. В жидкостях же и в твердых телах атомы и молекулы расположены вплотную друг к другу. Об этом свидетельствует малая сжимаемость жидкостей и твердых тел: чтобы уменьшить объем жидкости или твердого тела, надо приложить очень большую силу.

2. КРИСТАЛЛЫ, АМОΡФНЫЕ ТЕЛА И ЖИДКОСТИ

Твердые тела бывают кристаллическими и аморфными. Рассмотрим сначала кристаллы.

КРИСТАЛЛЫ

Примеры кристаллов — поваренная соль, алмаз, металлы.

В кристаллах атомы или молекулы расположены упорядоченно, образуя кристаллическую решетку.

Поэтому говорят, что в кристаллических телах существует дальний порядок в расположении атомов. Например, в кристалле поваренной соли атомы натрия и хлора строго чередуются, располагаясь в вершинах куба (рис. 30.1).

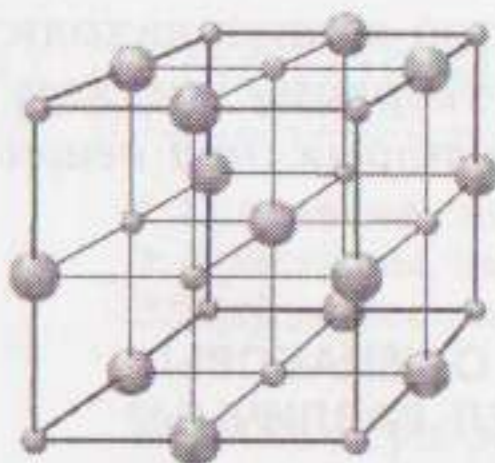


Рис. 30.1. Схематическое изображение кристаллической решетки поваренной соли (NaCl)

Атомы натрия и хлора условно обозначены шариками разных диаметров. В реальном кристалле эти атомы расположены практически вплотную друг к другу.

Строжайший порядок в расположении атомов кристалла вызывает вопрос: что же «заставляет» атомы выстраиваться в таком порядке? Ответ на этот вопрос дает следующий опыт.

Поставим опыт

Насыпем на часовое стекло одинаковые маленькие металлические шарики и начнем легонько потряхивать стекло. Мы увидим, что через некоторое время шарики расположатся в строгом порядке, очень напоминающем расположение атомов в кристалле (рис. 30.2).

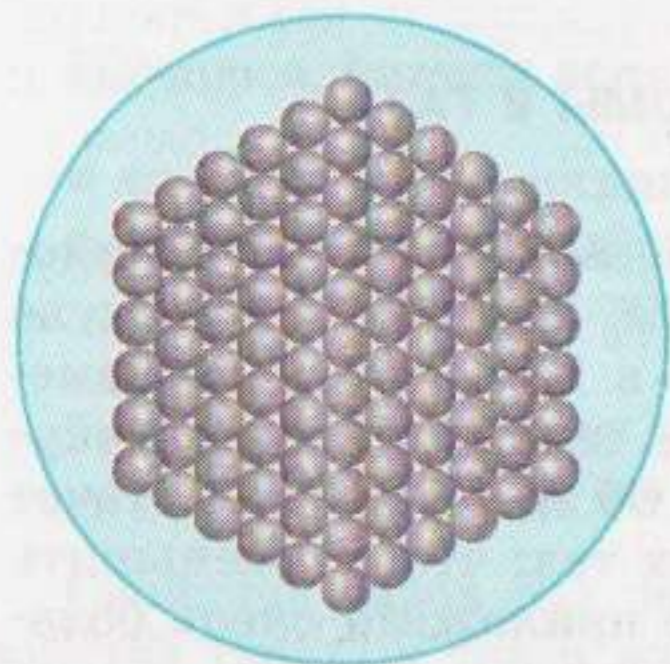


Рис. 30.2. Расположение шариков на часовом стекле моделирует образование кристаллической решетки

Шарики занимают положение, соответствующее минимальному значению потенциальной энергии.

Разгадка такого упорядочения состоит в том, что шарики располагаются на вогнутом стекле в самом низком из возможных положений, что соответствует *минимальному значению потенциальной энергии шариков*.

По той же самой причине упорядочиваются и атомы кристалла: они занимают положение, соответствующее минимальному значению потенциальной энергии взаимодействия атомов.

Плавление кристаллических тел

Опыты показывают, что

кристаллы плавятся при определенной температуре, называемой температурой плавления.

Например, лед плавится при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$: при температуре выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вода жидкая, а при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — твердая (лед). При $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ может существовать смесь льда с водой — например, мокрый снег.

Поставим опыт

Поместим сосульку или ледяной кубик над пламенем спиртовки. Мы увидим, что сосулька тает, но лед остается твердым телом (рис. 30.3).



Рис. 30.3. Плавление льда

При нагревании лед не размягчается, а превращается в воду.

Зависимость свойств кристалла от типа кристаллической решетки

Свойства кристалла определяются не только видом атомов, но и типом кристаллической решетки. Поясним это на примере графита и алмаза. Как ни удивительно, мягкий черный графит и твердый прозрачный алмаз состоят из *одних и тех же* атомов — атомов углерода.

Кристаллическая решетка графита имеет слоистую структуру, причем эти слои слабо связаны друг с другом, потому что расстояние между ними в несколько раз больше, чем расстояние между соседними атомами в одном слое (рис. 30.4, *а*). Поэтому слои легко отделяются друг от друга, чем и объясняется мягкость графита.

В кристаллической же решетке алмаза все атомы сильно связаны со своими ближайшими соседями. Именно этой жесткой связью атомов и обусловлена уникальная твердость алмаза (рис. 30.4, *б*).

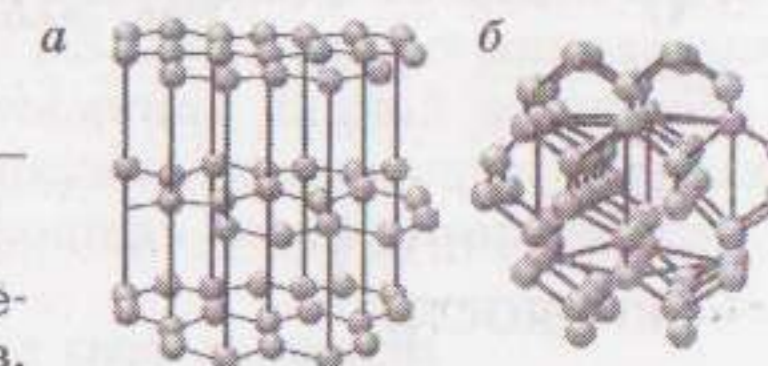


Рис. 30.4. Кристаллические решетки: *а* — графита; *б* — алмаза

Эти столь разные по своим свойствам вещества состоят из одних и тех же атомов.

АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Примерами аморфных тел являются смола и стекло.

В аморфных телах сохраняется порядок в расположении только ближайших «соседей», поэтому говорят, что

в аморфных телах есть «ближний порядок» в расположении атомов и молекул.

Текучесть и размягчение аморфных тел при повышении температуры

Из-за наличия только ближнего порядка атомы или молекулы в аморфных телах время от времени «перескакивают» из одного положения в другое. Если на аморфное тело действуют внешние силы, «перескоки» молекул в одном направлении происходят чаще, чем в других. В результате форма тела постепенно изменяется, то есть аморфные тела обладают *текучестью*¹.

Стекло обладает текучестью даже при комнатной температуре, хотя и течет чрезвычайно медленно: например, оконные стекла постепенно утолщаются книзу, но это заметно только для окон старинных зданий.

С ростом температуры частота перескоков молекул или атомов увеличивается, и аморфное тело, *постепенно размягчаясь*, превращается в жидкость. Таким образом, в отличие от кристаллов,

аморфные тела не имеют определенной температуры плавления.

Например, если стекло нагреть, оно становится настолько мягким, что из него можно лепить. Это свойство стекла широко используется в искусстве и на производстве — благодаря ему стеклянным изделиям можно придавать практически любую форму.

Поставим опыт

Нагревая стеклянную палочку над пламенем, мы увидим, что стекло постепенно размягчается, но не тает (рис. 30.5).



Рис. 30.5. Размягчение стекла

ЖИДКОСТИ

Строение жидкостей сходно со строением аморфных тел:

в расположении молекул в жидкости существует только ближний порядок.

Отличие жидкостей от аморфных тел состоит главным образом в том, что жидкости обладают большей текучестью.

¹ Потому такие тела и названы аморфными: по-гречески «аморфос» — не имеющий формы.

Почему капли круглые?

Утверждение, что жидкость «не имеет своей формы», а всегда принимает форму сосуда, не совсем правильно: хорошо известно, что капельки жидкости принимают не любую, а именно *шарообразную* форму (рис. 30.6). В состоянии невесомости (в космическом корабле) форму шара принимает и большая масса жидкости.

Рис. 30.6. Капелька жидкости

Шарообразная форма капель обусловлена тем, что жидкость стремится уменьшить площадь своей поверхности.



Объяснение шарообразной формы капель состоит в том, что жидкость стремится *уменьшить* площадь своей поверхности, а из всех тел с заданным объемом наименьшую площадь поверхности имеет шар. Стремление жидкости уменьшить площадь своей поверхности называется *поверхностным натяжением*.

Поверхностному натяжению обычно препятствуют действующие на жидкость сила тяжести и сила давления стенок сосуда, «заставляющие» жидкость принять форму сосуда. Но для маленькой капельки, тем более падающей, основную роль в образовании ее формы играет поверхностное натяжение.

Поверхностное натяжение обусловлено тем, что молекулы в поверхностном слое жидкости обладают некоторой избыточной энергией по сравнению с молекулами в толще жидкости. Эта энергия называется *поверхностной энергией*.

Поверхностная энергия $E_{\text{пов}}$ пропорциональна площади S свободной поверхности жидкости: $E_{\text{пов}} = \sigma S$. Величина σ называется *коэффициентом поверхностного натяжения* данной жидкости.

Именно из-за стремления уменьшить поверхностную энергию жидкость и стремится уменьшить площадь своей поверхности.

Почему молекулы в поверхностном слое жидкости обладают избыточной энергией?

Чтобы извлечь молекулу из жидкости, надо преодолеть притяжение других молекул, то есть совершить *положительную* работу и, значит, *увеличить* энергию молекулы. Следовательно, потенциальная энергия молекулы, находящейся вне жидкости, *больше* потенциальной энергии молекулы, находящейся в жидкости.

Молекула в поверхностном слое жидкости взаимодействует с меньшим числом соседей, чем молекула в толще жидкости,

то есть эта молекула как бы «наполовину вырвана» из жидкости (рис. 30.7). Значит, потенциальная энергия такой «поверхностной» молекулы *больше*, чем потенциальная энергия молекулы в толще жидкости. А это и означает, что молекулы поверхностного слоя обладают *избыточной энергией* по сравнению с молекулами в толще жидкости.

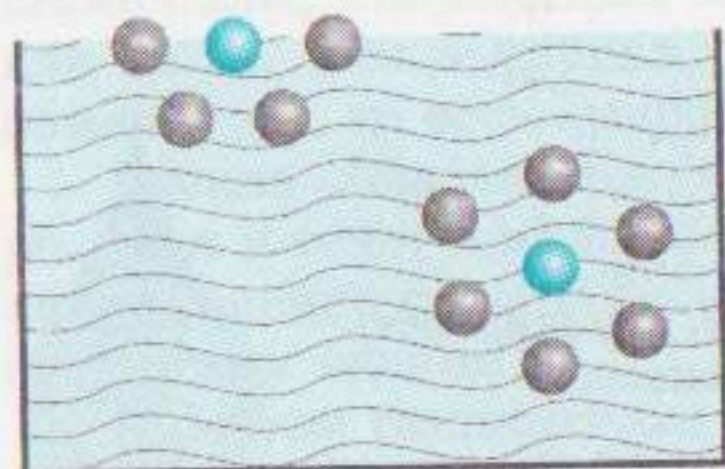


Рис. 30.7. Схематическое изображение молекул, находящихся на поверхности жидкости и в толще жидкости. Первые имеют меньше «соседей», чем вторые

Смачивание

По чистому стеклу вода растекается. При этом площадь соприкосновения воды со стеклом увеличивается. Обусловлено это тем, что молекулы воды сильнее притягиваются к молекулам, из которых состоит стекло, чем друг к другу. В таком случае говорят, что жидкость *смачивает* твердое тело.

Ртуть же по стеклу не растекается, потому что молекулы ртути сильнее притягиваются друг к другу, чем к молекулам, из которых состоит стекло. Так как ртуть не смачивает стекло, пролитая на стекло ртуть собирается в круглые капельки, форма которых, как мы уже знаем, определяется поверхностным натяжением.

По той же причине собирается в капельки и вода на покрытой жиром поверхности: вода не смачивает такие поверхности.

Капиллярные явления

Вследствие смачивания вода поднимается по тонким стеклянным трубкам, причем чем меньше внутренний диаметр трубки, тем выше поднимается вода (рис. 30.8). Тонкие трубки называют *капиллярами*¹, поэтому явление подъема жидкости в тонких трубках называется *капиллярностью*.

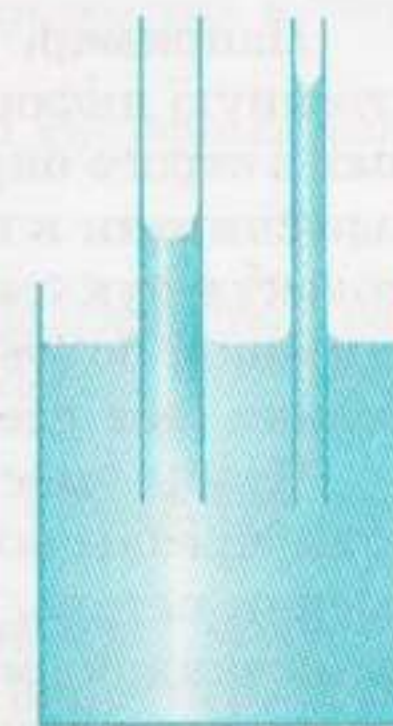
Вследствие явления капиллярности вода поднимается по стеблям растений и всасывается пористыми веществами.

Если жидкость не смачивает поверхность трубки, то жидкость будет не подниматься, а опускаться в трубке — так происходит, например, с ртутью в стеклянной трубке.

¹ От латинского слова «капиллус» — волос.

Рис. 30.8. Подъем воды в стеклянном капилляре

Чем меньше внутренний диаметр капилляра, тем выше поднимается вода.



Жидкие кристаллы

Во второй половине 20-го века начали активно изучать вещества, в которых в одном направлении существует дальний порядок в расположении молекул, а в двух других направлениях — только ближний. Эти вещества сочетают свойства жидкостей и кристаллов, поэтому их назвали *жидкими кристаллами*.

Жидкие кристаллы очень чувствительны к изменению внешних условий. Например, даже при небольшом изменении температуры, давления, электрического или магнитного полей они могут изменять цвет.

Это свойство жидких кристаллов используется в различных приборах — например, в жидкокристаллических медицинских термометрах. Особенно широко применяются жидкие кристаллы при изготовлении дисплеев — от часов и мобильных телефонов до компьютеров и телевизоров.

3. ДРУГИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

ПЛАЗМА

При температуре в тысячи и миллионы градусов скорости хаотического движения атомов становятся настолько большими, что их электронные оболочки полностью или частично разрушаются при столкновениях.

В результате образуются заряженные частицы — ионы и свободные электроны. Такой сильно ионизированный газ называется *плазмой*.

В земных условиях плазма — сравнительно редкое состояние вещества: обычно мы непосредственно можем наблюдать плазму только в виде молнии. Однако во вселенских масштабах именно плазма является наиболее распространенным состоянием вещества: например, в этом состоянии находится большинство звезд (в том числе и наше Солнце).

МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Живая материя на молекулярном уровне отличается *исключительно высокой степенью упорядоченности*.

Например, молекулы нуклеиновых кислот, несущие наследственную информацию, содержат миллионы атомов, расположенных в строго определенном порядке. Эти молекулы образуют двойные спирали в виде очень длинных цепей. Так, общая длина всех молекул нуклеиновых кислот, содержащихся в организме *одного* человека, более чем в 100 раз превышает расстояние от Земли до Солнца (вот где микромир «смыкается» с космосом!).

Чтобы уместиться в ядре клетки, молекула нуклеиновой кислоты чрезвычайно плотно упаковывается — на ней образуются тысячи петель, перегибов и т. д. Однако даже будучи так плотно упакованной, молекула нуклеиновой кислоты все время занимается сложнейшей деятельностью — построением столь же высокоупорядоченных огромных молекул белков¹.

Слаженное функционирование биологических молекул не может быть описано теми же средствами, какими описывается строение вещества в неживой материи.

Однако физика и биология, объединившись, породили новую науку — биофизику. Эта наука изучает строение живых организмов, используя методы как физики, так и биологии (а также других наук — например, химии и информатики).

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- В **кристаллах** атомы или молекулы расположены упорядоченно, образуя **кристаллическую решетку**; кристаллы плавятся при определенной температуре, называемой **температурой плавления**.
- В **аморфных** телах есть только «ближний порядок» в расположении атомов и молекул; аморфные тела обладают **текучестью**; аморфные тела не имеют определенной температуры плавления.
- В расположении молекул в жидкости существует только ближний порядок.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что общего у твердых тел и жидкостей? Чем они отличаются?
2. Что общего у жидкостей и газов? Чем они отличаются?

¹ Одним из первых ученых, начавших изучать свойства белков, был уже знакомый нам Гей-Люссак, именем которого назван закон теплового расширения газа при изобарном процессе.

3. Как расположены молекулы и атомы в газах, жидкостях и твердых кристаллических телах?
4. Что такое аморфные тела? Приведите примеры аморфных тел.
5. В чем проявляется явление смачивания?
6. Приведите примеры капиллярных явлений.
7. Может ли одно и то же вещество находиться одновременно в различных агрегатных состояниях? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.
- 8*. Почему свойства всех газов почти одинаковы, а свойства жидкостей и твердых тел столь различны?
- 9*. Оцените, какой объем приходится в среднем на одну молекулу в окружающем вас воздухе: для этого можно, например, объем воздуха в комнате разделить на число молекул в нем. Во сколько раз этот объем больше объема самой молекулы? Для оценки примите, что плотность воздуха равна $1,3 \text{ кг/м}^3$.
- 10*. Что такое дальний порядок и ближний порядок? Для каких состояний вещества характерен дальний порядок, а для каких — ближний?
- 11*. Что «заставляет» атомы в кристаллах располагаться упорядоченно?
- 12*. Имеется образец твердого тела. С помощью каких опытов можно определить, является это тело кристаллическим или аморфным?
- 13*. Каковы особенности плазмы?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Все вещества состоят из мельчайших частиц**, которые находятся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействуют друг с другом.
- Величины, характеризующие состояние макроскопических тел в целом, называют **макроскопическими** параметрами. Основные макроскопические параметры — давление, объем и температура.
- Величины, характеризующие свойства отдельных молекул вещества, называют **микроскопическими** параметрами. Примеры микроскопических параметров — масса молекулы и ее средняя кинетическая энергия.
- **Уравнением состояния** называется соотношение между макроскопическими параметрами (температурой, объемом и давлением).

- **Основная задача молекулярно-кинетической теории** — вывести уравнение состояния вещества, установив связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами.
- **Атомная единица массы** (а.е.м.) равна $\frac{1}{12}$ массы атома углерода. **Относительная молекулярная масса** M_r равна массе молекулы, выраженной в атомных единицах массы.
- **Один моль** — это количество вещества, которое содержит столько же молекул, сколько атомов углерода содержится в 12 г углерода. Количество вещества в молях обозначается ν .
- **Постоянной Авогадро** называют количество молекул в одном моле: $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль. Количество молекул в образце $N = \nu N_A$.
- **Молярная масса** M равна массе одного моля. Масса образца m связана с молярной массой соотношением $m = M \nu$.
- **Температура** характеризует состояние теплового равновесия: тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковую температуру.
- **Абсолютной температурой** называют температуру по абсолютной шкале температур (шкале Кельвина), а нуль по этой шкале — **абсолютным нулем температуры**. Он соответствует $t = -273$ °С по шкале Цельсия. Абсолютная температура обозначается T .
- **Изопроцессы:** для данной массы газа $\frac{V}{T} = \text{const}$ при $p = \text{const}$ (**изобарный** процесс); $\frac{p}{T} = \text{const}$ при $V = \text{const}$ (**изохорный** процесс); $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$ (**изотермический** процесс).
- **Уравнение Клапейрона:** для данной массы газа $\frac{pV}{T} = \text{const}$.
- **Закон Авогадро:** при одинаковых температуре и давлении в равных объемах различных газов содержится одинаковое количество молекул. Следствиями уравнения Клапейрона и закона Авогадро являются соотношения $\frac{pV}{T} = kN$ и $p = nkT$, где k — постоянная Больцмана: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

- **Уравнение Менделеева — Клапейрона:** $pV = \frac{m}{M} RT$, где m — масса газа, M — его молярная масса. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.
- **Идеальным газом** называют модель реального газа, в которой пренебрегают размерами молекул газа и их взаимодействием между столкновениями.
- **Основное уравнение молекулярно-кинетической теории:** $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$. Его можно записать также в виде $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$.
- **Абсолютная температура** является мерой средней кинетической энергии движения молекул. Для одноатомного газа $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$.
- В **кристаллах** атомы или молекулы расположены упорядоченно, образуя **кристаллическую решетку**; кристаллы плавятся при определенной температуре, называемой **температурой плавления**.
- В **аморфных** телах есть только «ближний порядок» в расположении атомов и молекул; аморфные тела обладают **текучестью** и не имеют определенной температуры плавления.
- В расположении молекул в жидкости существует только ближний порядок.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

1. Сколько молей содержится в 4 г водорода? В полном стакане воды?
2. Ртутный термометр показывает температуру 37 °С. Какой абсолютной температуре это соответствует?
3. Может ли человек находиться при температуре 300 К? Какой температуре по Цельсию она соответствует?
4. В сосуде находится некоторая масса идеального газа. Объем газа увеличили в 2 раза, а абсолютную температуру уменьшили в 2 раза. Как изменилось давление газа?

5. В сосуде находится некоторая масса идеального газа. Объем газа уменьшили в 2 раза, а давление газа увеличили в 2 раза. Как изменилась абсолютная температура газа?
6. В сосуде находится некоторая масса идеального газа. Давление газа увеличили в 3 раза, а абсолютную температуру уменьшили в 2 раза. Как изменился объем газа?
7. Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа уменьшилась в 3 раза при неизменной концентрации. Как изменилось давление газа?
8. Абсолютная температура идеального газа увеличилась в 3 раза. Как изменилась средняя кинетическая энергия молекул?

Глава 6

ТЕРМОДИНАМИКА



Раздел физики, изучающий общие законы тепловых явлений, называют термодинамикой. Термодинамика имеет большое значение для разработки и создания тепловых двигателей, широкое применение которых изменило ход мировой истории.

В этой главе мы рассмотрим законы термодинамики, принципы работы тепловых двигателей, холодильников и кондиционеров, а также вопросы охраны окружающей среды.

Кроме того, мы рассмотрим фазовые переходы, то есть переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое.

§ 31. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Внутренняя энергия
2. Закон сохранения энергии в тепловых явлениях

В этом параграфе мы расскажем, какими огромными запасами внутренней энергии обладают тела. Выясним способы изменения внутренней энергии.

Мы рассмотрим также закон сохранения энергии, который применительно к тепловым процессам получил название первого закона термодинамики.

1. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Энергия хаотического движения молекул является лишь малой долей всей энергии, заключенной в теле.

Дело в том, что атомы и молекулы не только движутся, но и взаимодействуют друг с другом, то есть обладают не только кинетической, но и потенциальной энергией.

Сумму кинетической энергии хаотического движения всех частиц, входящих в состав данного тела, и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом называют внутренней энергией.

В каких процессах и каким образом может изменяться внутренняя энергия?

При изменении температуры тела изменяется кинетическая энергия хаотического движения атомов и молекул, а также потенциальная энергия взаимодействия атомов и молекул в жидкостях и твердых телах.

При химических реакциях (например, горении или взрыве) и изменении агрегатного состояния вещества (например, при переходе из жидкого состояния в твердое или газообразное) изменяется потенциальная энергия атомов, входящих в состав молекул.

При ядерных реакциях изменяется потенциальная энергия частиц, входящих в состав атомного ядра.

Рассмотрим примеры, которые помогут вам представить «масштабы» изменений внутренней энергии.

ПРИМЕРЫ ИЗМЕНЕНИЙ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ

В чем проявляется изменение внутренней энергии	Пример механического эквивалента
<i>Нагревание и охлаждение</i>	
При изменении температуры изменяется кинетическая энергия хаотического движения молекул, а в жидкости и твердом теле — также и потенциальная энергия взаимодействия молекул.	Чтобы нагреть от комнатной температуры до температуры кипения 1 л воды, надо затратить столько же энергии, сколько нужно для подъема легкового автомобиля на двенадцать этажей (рис. 31.1). Такая же энергия выделяется при охлаждении 1 л воды от температуры кипения до комнатной температуры.
<i>Плавление и кристаллизация</i>	
При разрушении или образовании кристаллической решетки изменяется потенциальная энергия взаимодействия атомов или молекул.	Чтобы расплавить 1 кг льда, надо затратить столько же энергии, сколько нужно для подъема легкового автомобиля на десять этажей. Такая же энергия выделяется при кристаллизации 1 л воды.
<i>Испарение и конденсация</i>	
При разрыве или образовании связей между молекулами изменяется потенциальная энергия их взаимодействия.	Чтобы испарить 1 кг воды, надо затратить столько же энергии, сколько нужно для подъема легкового автомобиля на 70 этажей. Такая же энергия выделяется при конденсации 1 кг водяного пара.
<i>Химические реакции, идущие с выделением тепла</i>	
При перестройке молекул происходит превращение потенциальной энергии взаимодействия атомов в кинетическую энергию хаотического движения молекул.	При сгорании 1 кг бензина выделяется столько же энергии, сколько нужно для подъема легкового автомобиля на гору высотой 4,5 км.
<i>Ядерные реакции</i>	
При делении или синтезе (объединении) атомных ядер происходит превращение потенциальной энергии взаимодействия частиц, входящих в состав атомного ядра, в кинетическую энергию хаотического движения частиц и энергию излучения.	При полном делении ядер в 1 кг урана выделяется энергия, достаточная для «забрасывания» груженого железнодорожного состава на Луну.

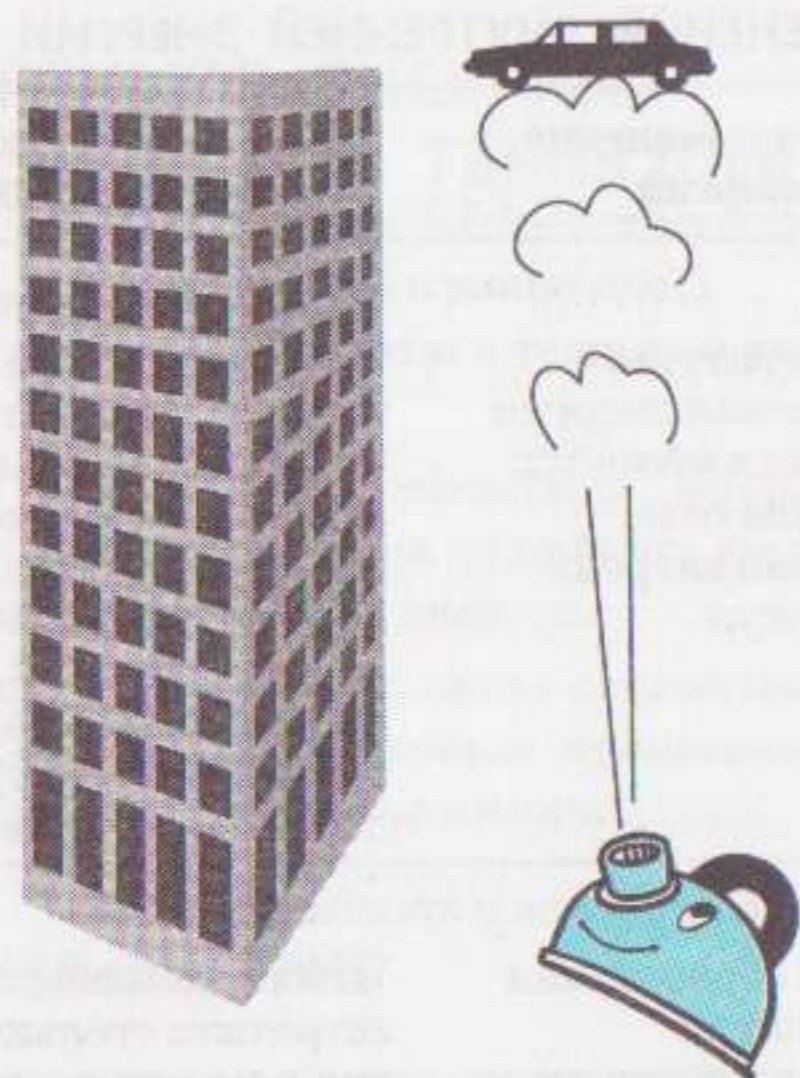


Рис. 31.1. К сравнению внутренней и механической энергий

На рис. 31.2 схематически (без соблюдения масштаба) представлено соотношение между различными видами энергии, которыми обладает данное тело. Мы видим, что непосредственно наблюдаемая механическая энергия составляет лишь очень малую долю всей энергии, присущей телу.



Рис. 31.2. Схематическое изображение различных видов энергии, которыми обладает тело

В этой главе мы будем рассматривать только верхние три уровня изображенной «пирамиды энергий» и поэтому под «внутренней энергией» будем понимать только кинетическую энергию хаотического движения молекул и потенциальную энергию их взаимодействия. Ядерные реакции мы рассмотрим в курсе физики 11-го класса.

2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЯХ

СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ

Из курса физики основной школы вы знаете, что внутреннюю энергию тела можно изменить двумя способами (рис. 31.3):

- 1) посредством *теплопередачи*, то есть без совершения работы (при контакте с телом другой температуры);
- 2) посредством *совершения работы*.

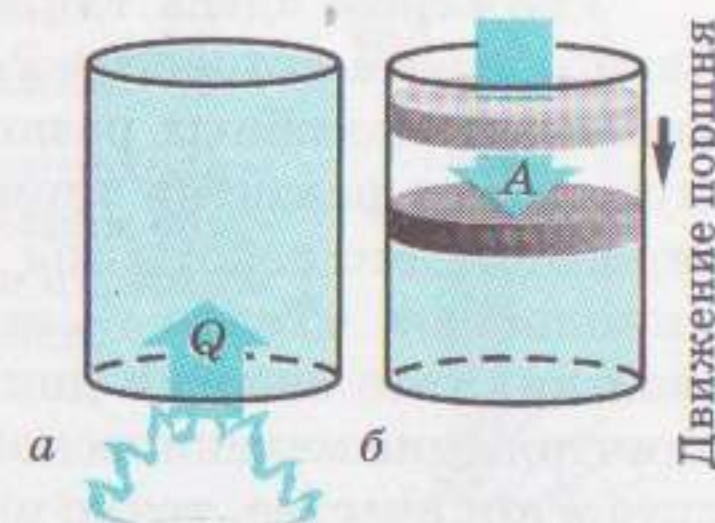


Рис. 31.3. Способы изменения внутренней энергии: а — посредством теплопередачи; б — посредством совершения работы

Мера изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи называется *количеством теплоты* и обозначается Q . Количество теплоты измеряется в джоулях.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Обозначим изменение внутренней энергии тела ΔU , а работу, совершенную *над* этим телом, обозначим A . Согласно закону сохранения энергии

изменение внутренней энергии тела равно сумме количества теплоты, переданного телу, и работы, совершенной над телом:

$$\Delta U = Q + A.$$

Закон сохранения энергии применительно к тепловым явлениям получил название *первого закона термодинамики*.

Часто используют и другую формулировку первого закона термодинамики, в которой полученное телом количество теплоты выражается через изменение внутренней энергии и работу, совершенную *телом*.

Обозначим эту работу A_r , поскольку в тепловых двигателях работу совершает газ. Работа A_r связана с работой A , совершенной над телом, соотношением $A_r = -A$. Тогда первый закон термодинамики можно сформулировать так:

количество теплоты, переданное телу, равно сумме изменения внутренней энергии тела и работы, совершенной телом:

$$\Delta U = Q + A.$$

(Примеры применения первого закона термодинамики к различным газовым процессам рассмотрены ниже, а также в § 34. Примеры решения задач по термодинамике.)

Кто открыл первый закон термодинамики?

Первый закон термодинамики является одной из формулировок закона сохранения энергии, открытого, как вы уже знаете, Майером, Джоулем и Гельмгольцем (см. § 19. Энергия. Закон сохранения механической энергии).

Упомянем здесь также французского ученого М. Л. Сади Карно, работа которого «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» сыграла особенно большую роль в развитии термодинамики. Вот что он писал (при цитировании его работы мы используем современную научную терминологию): «Тепло — это механическая энергия, изменившая свой вид: это энергия движения частиц тела. Когда происходит уничтожение механической энергии, возникает одновременно теплота в количестве, точно равном количеству исчезнувшей механической энергии. И, наоборот, при исчезновении теплоты всегда возникает механическая энергия. Таким образом, энергия существует в природе в неизменном количестве; она никогда не создается и никогда не уничтожается, изменяя только свою форму».

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Изохорный процесс

Если газ нагревается или охлаждается при неизменном объеме (например, в толстостенном металлическом баллоне), он не двигает поршень, то есть не совершает работы. Следовательно, внутренняя энергия газа изменяется только посредством теплопередачи. Из первого закона термодинамики следует, что в этом случае $\Delta U = Q$.

Изотермический процесс

Как мы уже знаем (см. § 28. Температура и средняя кинетическая энергия молекул газа), внутренняя энергия газа зависит только от температуры и поэтому при изотермическом процессе не изменяется, то есть $\Delta U = 0$. Поэтому из первого закона термодинамики следует, что в случае изотермического процесса $Q = A_r$.

Если газ расширяется, он совершает положительную работу, равную, как мы видим, получаемому им количеству теплоты (через стенки сосуда).

Адиабатный процесс

Вы, может быть, замечали, что при накачивании велосипедной камеры насос нагревается. Происходит это потому, что при сжатии газа мы производим над ним работу, увеличивая его внутреннюю энергию. При очень быстром сжатии газ нагревается настолько, что находящаяся в нем горючая смесь может воспламениться (рис. 31.4). Это используется в дизельных двигателях.

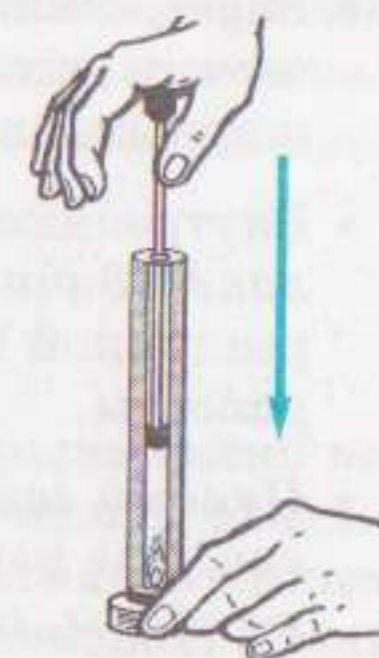


Рис. 31.4. Нагревание газа при быстром сжатии

На дне толстостенного прозрачного цилиндра находится кусочек сухой ваты. Если очень быстро (резким толчком) вдвинуть в цилиндр поршень, воздух в цилиндре нагреется так сильно, что вата воспламенится.

При расширении же газа его температура часто понижается: в этом случае работу производит газ, и поэтому его внутренняя энергия уменьшается. Это объясняет, почему газированная вода, в которой расширяются пузырьки газа, прохладнее окружающего воздуха.

Образование облаков также объясняется охлаждением газа при расширении. Нагретый от поверхности Земли воздух, поднимаясь вверх, расширяется (так как давление воздуха с увеличением высоты уменьшается) и вследствие этого охлаждается. При охлаждении находящийся в воздухе водяной пар конденсируется, превращаясь в крошечные капельки воды.

Приведенные примеры соответствуют случаям, когда теплопередача мала — то ли потому, что сосуд с газом теплоизолирован, то ли потому, что процесс происходит настолько быстро, что теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Процесс, происходящий без теплопередачи, называется *адиабатным*.

В случае адиабатного процесса $Q = 0$, поэтому из первого закона термодинамики следует, что $A_r = -\Delta U$, то есть газ совершает работу только за счет изменения своей внутренней энергии.

Изобарный процесс

В § 34. Примеры решения задач по термодинамике доказано, что при изобарном расширении работа газа $A_r = p\Delta V$, где p — давление газа, ΔV — изменение его объема (при расширении $\Delta V > 0$). При расширении газ совершает работу, то есть $A_r > 0$. Согласно закону Гей-Люссака

при изобарном расширении газа температура увеличивается, значит, увеличивается и его внутренняя энергия, то есть $\Delta U > 0$. Тогда из первого закона термодинамики, записанного в виде $Q = \Delta U + A_r$, следует, что $Q > 0$, то есть газ может расширяться изобарно только при условии, что к нему подводится некоторое количество теплоты.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Внутренняя энергия** — это сумма кинетической энергии хаотического движения всех частиц, входящих в состав данного тела, и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.
- Внутреннюю энергию тела можно изменить посредством **теплопередачи**, то есть без совершения работы (при контакте тел различной температуры), а также посредством **совершения работы**.
- **Первый закон термодинамики**: изменение внутренней энергии тела равно сумме количества теплоты, переданного телу, и работы, совершенной над телом: $\Delta U = Q + A$. Другая формулировка: количество теплоты, переданное телу, равно сумме изменения внутренней энергии тела и работы, совершенной телом: $Q = \Delta U + A_r$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое внутренняя энергия?
2. Как изменяется внутренняя энергия твердого тела при: а) нагревании; б) охлаждении; в) плавлении?
3. Какие вы знаете способы изменения внутренней энергии?
4. Вы подержали в руке монету, и она нагрелась. Каков был в этом случае способ изменения внутренней энергии монеты?
5. Что такое количество теплоты? Какова единица количества теплоты?
6. Сформулируйте первый закон термодинамики.
- 7*. Телу передали некоторое количество теплоты, причем тело не совершило работы. Изменилась ли при этом внутренняя энергия тела? Если да, то увеличилась она или уменьшилась?
- 8*. Какой раздел физики называют термодинамикой?
- 9*. Следствием какого закона является первый закон термодинамики?
- 10*. Как связано переданное телу количество теплоты с изменением внутренней энергии тела при изохорном процессе?
- 11*. Изменяется ли внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе, когда давление увеличивается?
- 12*. Какой процесс называют адиабатным?

§ 32. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ, ХОЛОДИЛЬНИКИ И КОНДИЦИОНЕРЫ

1. Тепловые двигатели
2. Холодильники и кондиционеры

В этом параграфе мы рассмотрим принцип действия тепловых двигателей и пути повышения их эффективности.

Кроме того, расскажем о принципах действия холодильника и кондиционера.

1. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Диапазон применения тепловых двигателей чрезвычайно велик — от автомобилей до электростанций и космических ракет.

Широкое применение тепловых двигателей стало возможным благодаря открытиям ученых и изобретениям инженеров. Среди ученых следует особо отметить французского ученого Карно, первым разработавшего теорию тепловых двигателей, а среди инженеров — английского изобретателя Дж. Уатта, именем которого названа единица мощности ватт.

В России первую паровую машину построил Иван Иванович Ползунов в 1765 году (еще до появления работ Дж. Уатта).

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

В тепловых двигателях химическая энергия топлива преобразуется в механическую энергию. Это осуществляется в два этапа.

1) При сгорании топлива химическая энергия (потенциальная энергия взаимодействия атомов) преобразуется в кинетическую энергию хаотического движения молекул. При этом нагревается некоторая масса газа, которая называется *рабочим телом*.

2) Газ (рабочее тело) расширяется, совершая работу (двигая поршень). При этом газ охлаждается, то есть кинетическая энергия хаотического движения молекул преобразуется в механическую энергию.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Действие теплового двигателя имеет *циклический характер*: после того как рабочее тело (газ) расширилось, совершив работу, его необходимо сжать до прежнего объема, чтобы оно могло совер-

шить работу в следующем цикле. Однако, сжимая газ, приходится совершать работу *над газом*. Эта работа должна быть *меньше* работы, совершенной газом, — ведь только в этом случае тепловой двигатель будет совершать полезную работу. Значит, расширение газа должно происходить при большем давлении, а следовательно, и при *более высокой температуре*, чем сжатие.

Таким образом, для того чтобы тепловой двигатель совершал полезную работу, необходимо периодически *нагревать* и *охлаждать* рабочее тело, то есть периодически передавать рабочему телу и отбирать у него некоторое количество теплоты. Поэтому тепловой двигатель должен состоять из трех основных элементов:

- 1) рабочее тело — обычно газ;
- 2) нагреватель, имеющий температуру T_1 , в контакте с которым рабочему телу сообщается количество теплоты Q_1 ;
- 3) холодильник¹, имеющий температуру $T_2 < T_1$, в контакте с которым от рабочего тела отбирается количество теплоты Q_2 .

Нагревателем является сжигаемое топливо, а холодильником — чаще всего окружающий воздух или вода водоемов.

ПОЛЕЗНАЯ РАБОТА ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

По завершении каждого цикла рабочее тело возвращается в исходное состояние, поэтому изменение внутренней энергии рабочего тела за цикл $\Delta U > 0$. Тогда из первого закона термодинамики следует, что полезная работа, совершенная двигателем, $A_n = Q_1 - Q_2$, где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, а Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику (рис. 32.1).



Рис. 32.1. Основные элементы теплового двигателя и превращения энергии при его работе

Полезная работа равна разности количества теплоты, полученного рабочим телом от нагревателя, и количества теплоты, отданного холодильнику.

¹ Наверное, точнее было бы называть его «охладителем» (по аналогии с нагревателем), поскольку холодильником называется также широко применяемый прибор для охлаждения (его работа будет рассмотрена ниже).

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД) ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эффективность теплового двигателя тем выше, чем большую полезную работу A_n он совершает при том же количестве теплоты Q_1 , полученном от нагревателя.

Коэффициентом полезного действия η теплового двигателя называют отношение полезной работы A_n , совершенной двигателем, к количеству теплоты Q_1 , полученному от нагревателя и выраженному в процентах: $\eta = \frac{A_n}{Q_1} \cdot 100\%$.

Поскольку $A_n = Q_1 - Q_2$, получаем, что $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$.

Количество теплоты Q_2 , переданное холодильнику, всегда больше нуля, поэтому коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100%.

Таким образом, в механическую работу можно превратить только *часть* теплоты, полученной от нагревателя.

Максимально возможный КПД теплового двигателя

При создании тепловых двигателей возник вопрос: каков максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя при заданных температурах нагревателя и холодильника? Ответ на этот важнейший для теории тепловых двигателей вопрос дал Карно в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

Карно доказал, что идеальный тепловой двигатель имеет

максимально возможный коэффициент полезного действия $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot 100\%$.

Как увеличить КПД теплового двигателя?

Из формулы для максимально возможного КПД теплового двигателя видно, что для его повышения следует уменьшать отношение $\frac{T_2}{T_1}$. Этого можно достичь двумя способами: либо понижая температуру холодильника T_2 , либо повышая температуру нагревателя T_1 . Однако температура холодильника T_2 не может быть ниже температуры окружающего воздуха, поэтому реально увеличивать η_{\max} можно, только увеличивая температуру нагревателя T_1 . При этом, однако, следует учесть, что температура нагревателя не должна превышать температуру плавления материалов, из которых изготовлен двигатель.

Формула $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$ соответствует максимально возможному КПД теплового двигателя. Такой КПД имел бы «идеальный тепловой двигатель», в котором отсутствовал бы контакт между телами с различной температурой. Однако такой тепловой двигатель, имея теоретически максимально возможный КПД, с практической точки зрения был бы далеко не идеален, так как в этом случае теплопередача происходила бы бесконечно медленно. Поэтому у реальных тепловых двигателей, в которых есть контакт между телами с различной температурой, КПД намного меньше, чем максимально возможный. Например, у двигателя внутреннего сгорания $\eta_{\max} \approx 70\%$, а реальный КПД не превышает 30%. Дизельные двигатели имеют КПД около 40%.

2. ХОЛОДИЛЬНИКИ И КОНДИЦИОНЕРЫ

В этом разделе мы будем использовать слово «холодильник» в другом значении (для многих более привычном). Мы будем называть так *холодильную машину*, то есть прибор, предназначенный для охлаждения, например, продуктов.

ХОЛОДИЛЬНИК

То, что холодильник *охлаждает* находящиеся в нем продукты, известно всем, а вот то, что при этом он *нагревает* воздух в помещении, знает далеко не каждый. Но прикоснитесь осторожно к тонким трубкам теплообменника на задней стенке домашнего холодильника — вы почувствуете, что они горячие!

Таким образом, холодильник передает тепло от *менее нагретого* тела (холодных продуктов в холодильной камере) *более нагретому* телу (воздуху в помещении).

Однако для осуществления потока тепла в *обратном* направлении (от холодного тела к горячему) необходимо *совершать работу*. В холодильнике эту работу совершает электродвигатель: вот почему для работы холодильника его надо подключать к электрической сети (рис. 32.2).

Чтобы понять принцип работы холодильника, представим, что рабочее тело (газ) совершает цикл в обратном направлении — расширяется при более низкой температуре, а сжимается — при более высокой. Расширяясь при низкой температуре, газ *отнимает тепло у более холодного тела*, а сжимаясь при высокой температуре, он *отдает тепло более нагретому телу*¹.

¹ В бытовых и промышленных холодильниках вместо расширения и сжатия газа происходит испарение и конденсация специальной жидкости: при испарении поглощается большое количество теплоты, а при конденсации — выделяется (см. § 35. Фазовые переходы).

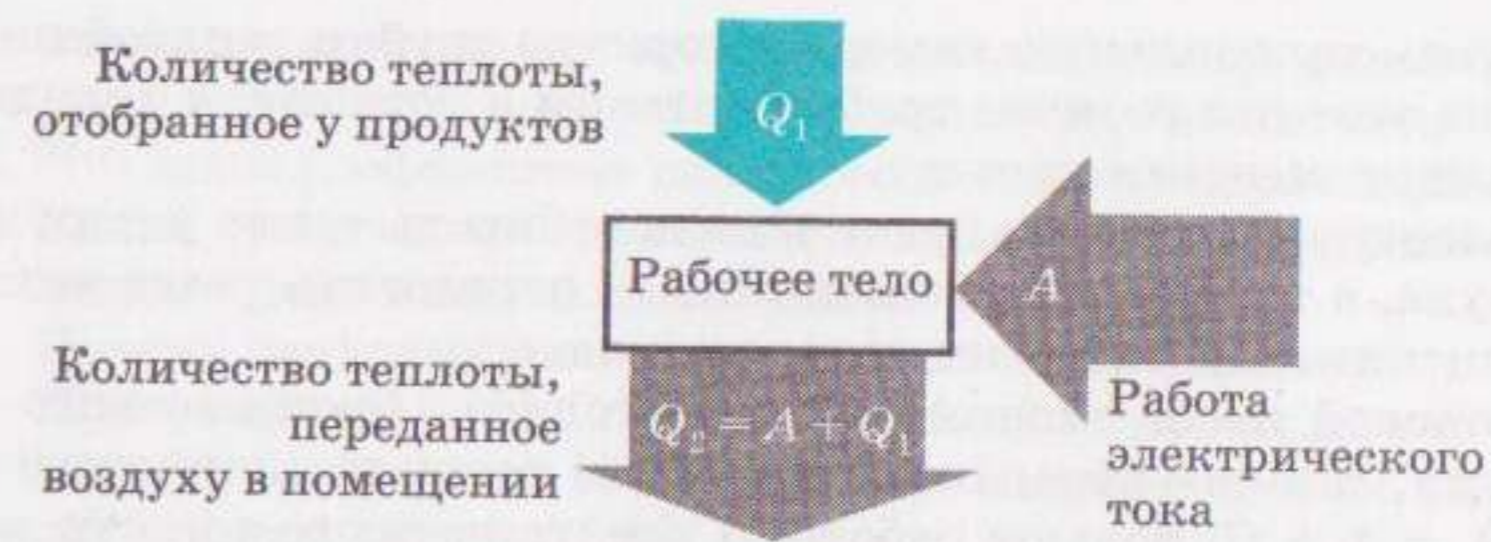


Рис. 32.2. Превращения энергии при работе холодильника

Чтобы осуществлять поток тепла в обратном направлении (от холодного тела к горячему), приходится *совершать работу*: ведь теперь надо сжимать газ при высокой температуре, то есть при высоком давлении, а расширяется он при низкой температуре, то есть при низком давлении. Сжатие газа в холодильной машине осуществляет компрессор, который потребляет энергию из электрической сети.

КОНДИЦИОНЕР И ТЕПЛОВЫЙ НАСОС

Кондиционер

Если открытую холодильную камеру холодильника оставить *внутри* комнаты, а горячие трубки теплообменника вынести *наружу*, то холодильная камера будет отбирать тепло у воздуха в комнате, а горячие трубки теплообменника будут отдавать тепло наружному воздуху. В результате комната будет охлаждаться, а наружный воздух — нагреваться. Именно так и работает *кондиционер* (рис. 32.3).

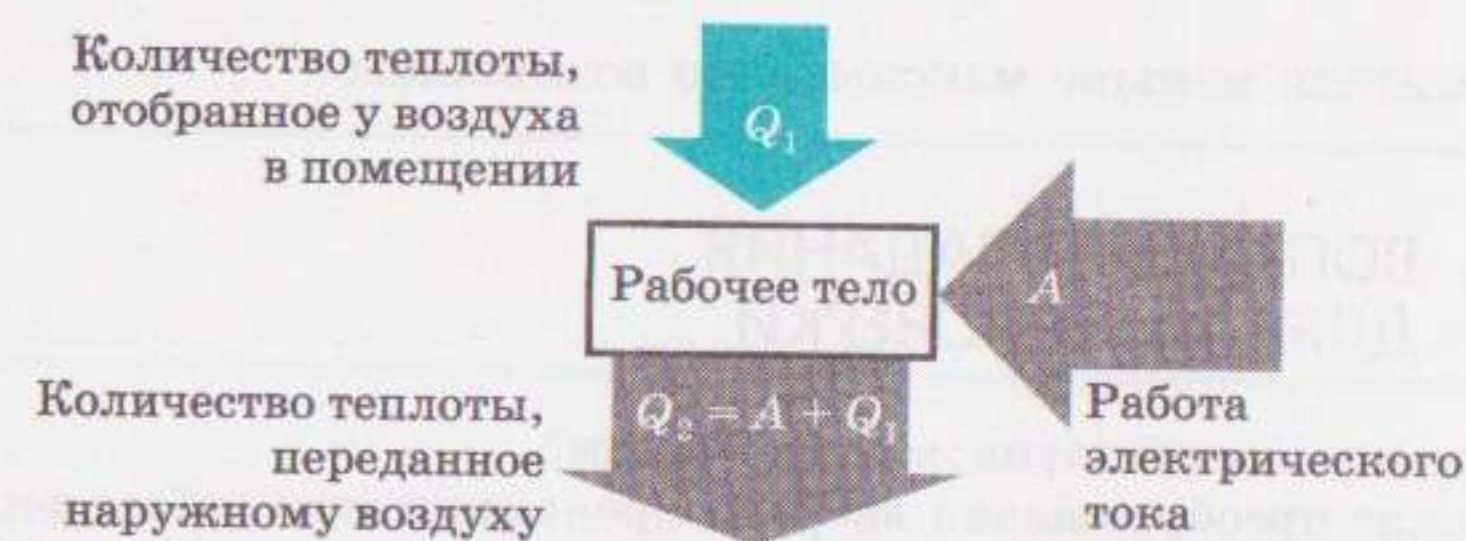


Рис. 32.3. Превращения энергии при работе кондиционера

Тепловой насос

Интересно, что прибор с таким же принципом действия, что у холодильника, можно использовать не только для охлаждения, но и для *обогрева* помещения! Для этого снова «разнесем в про-

странстве» холодильную камеру и горячие трубки теплообменника, но на этот раз горячие трубки оставим в комнате, а холодильную камеру вынесем наружу.

Холодильная камера будет теперь отбирать тепло у наружного воздуха, а трубки теплообменника — передавать тепло воздуху в помещении. Мы получим *тепловой насос*.

Тепловой насос экономически выгоднее электрического обогревателя, так как переданное воздуху в комнате количество теплоты $Q_2 = A + Q_1$ больше работы A электрического тока на величину Q_1 , равную количеству теплоты, отобранному у наружного воздуха.

Современные бытовые кондиционеры конструируют обычно так, что они могут работать и как кондиционеры, и как тепловые насосы — в зависимости от времени года.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Основные элементы теплового двигателя:** рабочее тело, нагреватель и холодильник.

- **Полезная работа**, совершаемая тепловым двигателем, $A_{\text{п}} = Q_1 - Q_2$, где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику.

- **Коэффициент полезного действия** теплового двигателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1} \cdot 100\%. \text{ Максимально возможный КПД теплового}$$

$$\text{двигателя: } \eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%. \text{ КПД реального теплового}$$

двигателя меньше максимально возможного.

? ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Где используют тепловые двигатели?
2. Какие преобразования энергии происходят при работе теплового двигателя?
3. Каковы основные элементы теплового двигателя?
4. Как связана полезная работа, совершаемая тепловым двигателем, с количеством теплоты, полученным от нагревателя, и количеством теплоты, отданным холодильнику?
5. Количество теплоты, полученное тепловым двигателем от нагревателя за время одного цикла, равно 20 кДж, а количество теп-

лоты, отданное за это же время холодильнику, равно 15 кДж. Чему равна полезная работа, совершенная двигателем?

6. Что такое коэффициент полезного действия теплового двигателя?
7. Какие существуют возможности повышения коэффициента полезного действия теплового двигателя?
8. Почему тепловые двигатели назвали «тепловыми»?
- 9*. Превращается ли при работе теплового двигателя внутренняя энергия одного вида во внутреннюю энергию другого вида? Обоснуйте свой ответ.
- 10*. Зачем нужны нагреватель и холодильник при работе теплового двигателя?
- 11*. Что используют обычно в качестве холодильника при работе теплового двигателя? Проиллюстрируйте ваш ответ примерами.
- 12*. Количество теплоты, полученное тепловым двигателем от нагревателя за время одного цикла, равно 20 кДж, а количество теплоты, отданное за это же время холодильнику, равно 15 кДж. Каков КПД этого теплового двигателя?
- 13*. Почему коэффициент полезного действия теплового двигателя не может быть равен 100%?
- 14*. Чему равен максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя? Чем он определяется?
- 15*. Чем отличается действие бытового холодильника от действия теплового двигателя и что у них общего?
- 16*. Каков принцип работы кондиционера? Что общего у кондиционера с холодильником и чем они отличаются?

§ 33. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1. Необратимость процессов и второй закон термодинамики
2. Энергетический и экологический кризисы

В этом параграфе мы расскажем о втором законе термодинамики, связанном с необратимостью процессов в природе.

Мы покажем, что именно необратимость процессов обуславливает «энергетический кризис», а также рассмотрим последствия все возрастающего необратимого преобразования энергии на Земле, связанного с производственной деятельностью человека.

1. НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ И ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ

Среди происходящих вокруг нас явлений есть такие, которые могут протекать практически одинаково как в прямом, так и в «обратном» направлении во времени — как в фильме, который показывают в обратном порядке, от конца к началу. Такие явления называются *обратимыми*.

Явления же, которые могут протекать только в одном направлении, называются *необратимыми*.

Механические явления

Практически обратимыми являются механические явления, в которых очень мала роль трения: примерами могут служить колебания груза на нити или пружине. Если заснять такие явления, а затем показывать фильм в обратном порядке, зрители не заметят «обращения времени»: им будет казаться, что они наблюдают реальный процесс.

Однако те механические явления, в которых *трение* играет существенную роль, являются «очевидно» необратимыми: если показывать фильм о таких явлениях в обратном порядке, зрители сразу же заметят обратный порядок показа. Например, если при «прямом» показе фильма катящийся по траве мяч естественно замедляется и так же естественно в конце концов останавливается, то при «обратном» показе лежащий на траве мяч вдруг ни с того ни с сего совершенно «неестественно» начинает катиться, причем скорость его будет увеличиваться.

Тепловые явления

Среди тепловых явлений также есть обратимые. Например, при адиабатном сжатии и расширении газа (то есть при отсутствии теплопередачи) газ ведет себя подобно пружине: если надавить на поршень, под которым находится газ в теплоизолированном цилиндрическом сосуде, и затем отпустить поршень, он начнет совершать колебания — как груз, лежащий на пружине.

Однако те тепловые явления, в которых существенную роль играет *теплопередача*, явным образом необратимы, так как поток тепла направлен всегда в одну сторону — от горячего тела к холодному.

Можно было бы возразить, что домашний холодильник осуществляет передачу тепла в «обратном» направлении — от холодного тела к горячему (см. § 32. *Тепловые двигатели, холодильники и кондиционеры*). Но для этого, как мы видели, необходимо совершать работу. Она совершается электродвигателем, а электроэнергия для его работы вырабатывается на электростанции, где работа совершается тепловыми двигателями. Работа же тепловых двигателей всегда сопровождается необратимыми процессами, речь о которых пойдет дальше в этом параграфе.

Необратимость реальных процессов

Поскольку трение или теплопередача в той или иной степени присутствуют в любом процессе, все происходящие в природе процессы являются необратимыми. Например, колебания груза, подвешенного на нити или пружине, в конце концов затухают.

ОБУСЛОВЛЕНА ЛИ НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ ЗАКОНОМ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ?

Рассмотрим пример с мячом, который при «обратном» течении времени начинал бы сам катиться по траве. Может, такой процесс невозможен потому, что при этом нарушался бы закон сохранения энергии: действительно, откуда лежащий на траве мяч получил бы энергию, чтобы начать движение? Откуда затем берется энергия для разгона мяча?

Однако более внимательное рассмотрение показывает, что закон сохранения энергии в «обратных» процессах не нарушался бы. Ведь из-за трения мяч и трава нагреваются, то есть механическая энергия мяча превращается во внутреннюю энергию мяча и травы. Тогда что же мешает осуществиться обратному процессу: почему мяч не может приобрести механическую энергию за счет некоторого остывания мяча и травы?

Рассмотрим с этой точки зрения и процесс теплопередачи. В «обратном» процессе теплопередачи, когда горячее тело стано-

вилось бы еще горячее, а холодное — еще холоднее, закон сохранения энергии тоже не нарушался бы: ведь если количество теплоты, отданное холодным телом, равно количеству теплоты, полученному горячим телом, то суммарная внутренняя энергия обоих тел осталась бы неизменной!

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Исследования показали, что необратимость процессов обусловлена общей закономерностью, проявляющейся в том, что *более упорядоченное состояние вещества со временем переходит в менее упорядоченное*¹.

Например, механическое движение тела как целого вследствие трения превращается в *хаотическое* движение молекул. При теплопередаче «степень порядка» также уменьшается: когда тела имеют разную температуру, их молекулы «рассортированы» по энергиям (средняя энергия молекул одного тела больше средней энергии молекул другого тела), а после выравнивания температур средние энергии молекул обоих тел становятся одинаковыми.

Утверждение о необратимости процессов в природе получило название *второго закона термодинамики*.

Существует несколько равноценных с физической точки зрения формулировок этого закона. Например, Р. Клаузиус предложил такую наглядную формулировку:

невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача теплоты от холодного тела к горячему.

В этой формулировке непосредственно утверждается, что теплопередача может происходить только в одном направлении — от горячего тела к холодному.

Покажем, что из приведенной формулировки следует и необратимость механических процессов при наличии трения, то есть механическая работа не может совершаться только за счет охлаждения какого-либо тела (скажем, мяч не может начать катиться за счет охлаждения мяча и травы).

Действительно, если бы механическая работа могла совершаться только за счет охлаждения какого-либо тела, то ее можно было бы использовать для нагревания другого, более горячего тела — например, с помощью трения. Но тогда получилось бы, что единственным результатом этих процессов была бы передача теплоты от холодного тела к горячему, а это противоречит второму закону термодинамики в приведенной выше формулировке.

¹ Закономерность такого перехода обосновывается с помощью теории вероятностей, но это обоснование выходит за рамки нашего курса.

«Вечный двигатель» второго рода

Если бы можно было создать двигатель, который совершал бы работу только за счет охлаждения какого-либо тела, человечество получило бы практически неограниченный источник энергии — можно было бы, например, получать механическую энергию, охлаждая земли и воды тропических широт. Поэтому двигатель, который мог бы работать только за счет охлаждения какого-либо тела, называют «вечным двигателем» второго рода.

Однако такой двигатель невозможен: его существование противоречит второму закону термодинамики¹.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИСЫ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИЗИС

«Энергетический кризис», понимаемый как нехватка энергии для развития промышленного производства, считается сегодня одной из самых острых проблем цивилизации.

Но как согласовать энергетический кризис с законом сохранения энергии: ведь если энергия *сохраняется*, как ее может *не хватать*?

Дело в том, что энергетический кризис состоит не просто в нехватке энергии, а в нехватке энергии, *пригодной для преобразования в механическую энергию*.

Например, мы видели, что при работе тепловых двигателей происходит преобразование химической энергии топлива в механическую энергию. Это преобразование энергии является *необратимым*, а запасы топлива на нашей планете неуклонно уменьшаются: например, разведанных запасов нефти при нынешнем темпе ее использования хватит всего на несколько десятилетий. И этот темп продолжает расти!

Таким образом, энергетический кризис является следствием необратимости процессов, происходящих в природе и технике.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС

Вторая, не менее серьезная проблема, стоящая перед человечеством, — это «экологический кризис».

Огромные масштабы преобразования энергии уже начали оказывать «планетарное» воздействие на климат Земли и состав атмосферы.

¹ Интересно, что Карно сформулировал второй закон термодинамики именно как невозможность существования «вечного двигателя» второго рода.

Как вы уже знаете, для работы тепловых двигателей необходим холодильник, в контакте с которым рабочее тело отдает ему некоторое количество теплоты. Во всех тепловых двигателях в качестве такого холодильника используется окружающая среда (атмосферный воздух и вода открытых водоемов). В результате происходит повышение температуры окружающей среды, называемое «тепловым загрязнением» (рис. 33.1).

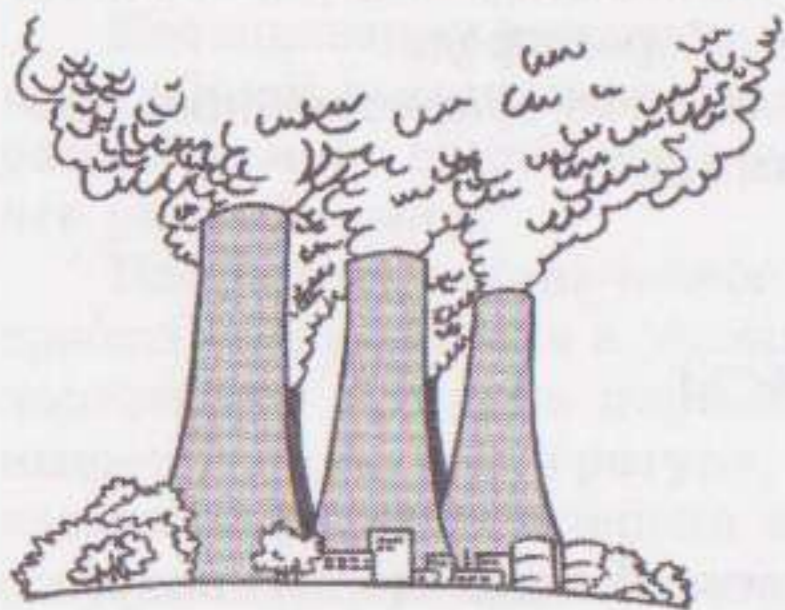


Рис. 33.1. Химическое и тепловое загрязнение окружающей среды тепловыми двигателями

Тепловое загрязнение усугубляется тем, что при сгорании огромного количества топлива повышается концентрация углекислого газа в земной атмосфере, а при большой концентрации углекислого газа атмосфера не «выпускает» в космическое пространство тепловое излучение нагретой Солнцем поверхности Земли.

В результате возникает «парниковый эффект», то есть температура повышается еще больше.

Поэтому вследствие работы большого и все возрастающего количества тепловых двигателей — в основном на электростанциях и в автомобилях — средняя температура на нашей Земле в течение последних десятилетий неуклонно повышается. Это грозит глобальным потеплением с весьма нежелательными последствиями, к числу которых относятся таяние ледников и подъем уровня Мирового океана.

Кроме того, при сжигании топлива в тепловых двигателях расходуется необходимый для жизни атмосферный кислород, а также образуются вредные вещества, загрязняющие атмосферу.

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Чтобы уменьшить негативные последствия работы тепловых двигателей, действуют в двух направлениях: с одной стороны, совершенствуют эти двигатели, повышая их КПД и уменьшая выбросы вредных веществ, с другой стороны, используют *энергосберегающие технологии*.

В странах, где эти технологии широко применяются, потребление энергии на производство той же самой продукции (например, автомобиля) в несколько раз ниже, чем в странах, где энергосберегающим технологиям пока еще не уделяют внимания.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Все происходящие в природе и технике процессы являются в той или иной степени *необратимыми*, то есть могут протекать только в одном направлении во времени.
- **Второй закон термодинамики** (в формулировке Клаузиуса): невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача теплоты от холодного тела к горячему. Отсюда следует, что механическая работа не может совершаться только за счет охлаждения какого-либо тела.
- Для уменьшения вредных воздействий тепловых двигателей на окружающую среду повышают КПД двигателей, уменьшают выброс вредных веществ и используют *энергосберегающие технологии*.

? ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Приведите примеры обратимых и необратимых процессов.
2. Сформулируйте второй закон термодинамики.
3. Как влияют тепловые двигатели на окружающую среду?
4. Чем обусловлен экологический кризис?
5. Как уменьшить вредное влияние тепловых двигателей на окружающую среду?
- 6*. Что означает необратимость процессов во времени?
- 7*. Какие механические явления являются обратимыми, а какие — необратимыми? Обоснуйте свой ответ.
- 8*. Какие тепловые явления являются обратимыми, а какие — необратимыми? Обоснуйте свой ответ.
- 9*. В каких случаях процессы и явления можно считать практически обратимыми?
- 10*. Может ли какой-либо реальный процесс быть в точности обратимым? Обоснуйте свой ответ.
- 11*. Связана ли необратимость процессов с законом сохранения энергии? Проиллюстрируйте свой ответ примерами.
- 12*. Почему существование энергетического кризиса не противоречит закону сохранения энергии?
- 13*. Что такое «вечный двигатель» второго рода? Какой закон природы делает его невозможным?

§ 34. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

1. Нахождение работы газа
2. Нахождение переданного газу количества теплоты
3. Циклические процессы

1. НАХОЖДЕНИЕ РАБОТЫ ГАЗА

Задача 1. РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗОБАРНОМ РАСШИРЕНИИ

Докажите, что при изобарном расширении работа газа $A_r = p \cdot \Delta V$, где p — давление газа, ΔV — изменение его объема.

Решение

При изобарном расширении газ давит на поршень с постоянной силой $F = pS$, где S — площадь поршня. Совершенная газом работа $A_r = F \cdot \Delta h = pS \cdot \Delta h$, где Δh — перемещение поршня. Так как $S \cdot \Delta h = \Delta V$, получаем $A_r = p \cdot \Delta V$.

Заметим для дальнейшего, что выражение $p \cdot \Delta V$ численно равно площади фигуры под графиком зависимости $p(V)$ (рис. 34.1).

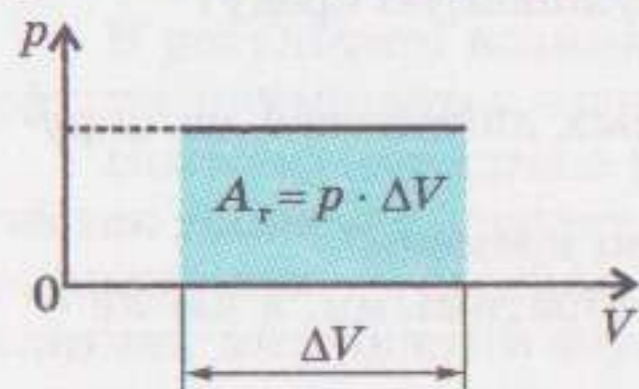


Рис. 34.1. Работа газа при изобарном расширении

Эта работа численно равна площади окрашенного прямоугольника.

Задача 2. ГРАФИЧЕСКОЕ НАХОЖДЕНИЕ РАБОТЫ ГАЗА

Докажите, что работа, совершенная газом при расширении, численно равна площади фигуры под графиком зависимости давления газа от его объема, то есть площади фигуры под графиком $p(V)$. Как найти работу, совершенную над газом при его сжатии?

Решение

Рассмотрим расширение газа, при котором его давление изменяется; на рис. 34.2 показан пример зависимости $p(V)$ для такого процесса.

Весь процесс расширения газа можно мысленно разбить на большое число этапов, в каждом из которых объем газа изменяется настолько мало, что давление газа можно считать практически

постоянным. Тогда для каждого этапа работа газа численно равна площади фигуры под соответствующим участком графика (см. задачу 1). Поэтому вся работа, совершенная газом при расширении, равна площади фигуры под всем графиком $p(V)$. Доказательство завершено.

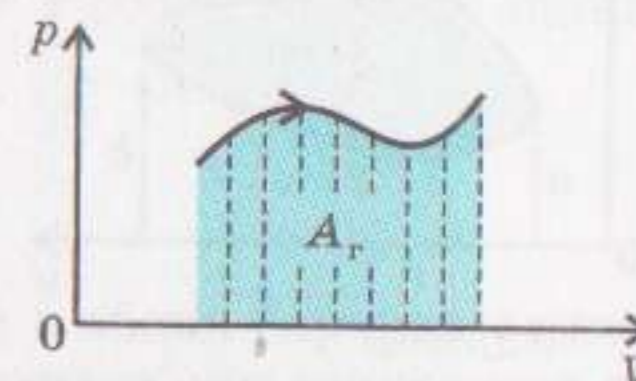


Рис. 34.2. Работа газа при расширении

Если происходит сжатие газа, он совершает отрицательную работу, равную по модулю площади фигуры под графиком $p(V)$ (рис. 34.3).

Совершенная над газом работа $A = -A_r$ при этом положительна и равна площади фигуры под графиком $p(V)$.

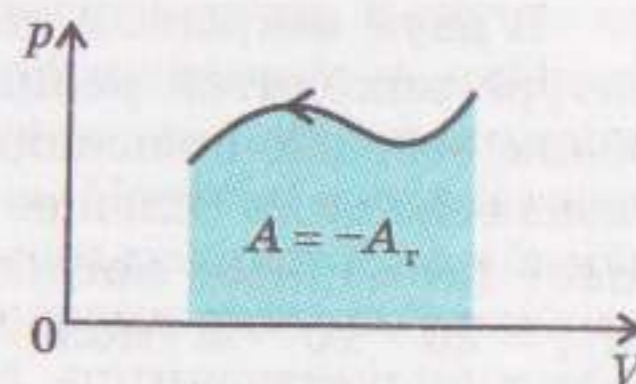


Рис. 34.3. Работа при сжатии газа

Задача 3. РАБОТА ГАЗА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Газ совершает циклический процесс, то есть возвращается к своему начальному состоянию (рис. 34.4). Докажите, что работа A_r , совершенная газом в этом процессе, численно равна площади, заключенной внутри цикла в координатах p, V .

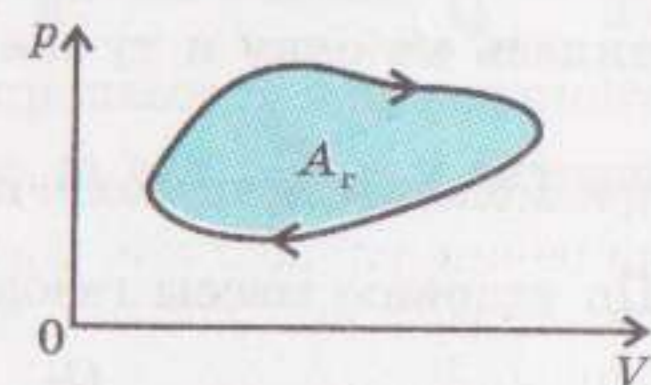


Рис. 34.4. Работа газа при циклическом процессе

Решение

Проведем изохоры a и b , соответствующие наименьшему и наибольшему объему газа в циклическом процессе (рис. 34.5). Тогда циклический процесс можно представить как последовательность процессов расширения (1) и сжатия (2). В процессе 1 газ совершает положительную работу, численно равную площади под кривой 1, а в процессе 2 — отрицательную работу, модуль кото-

рой численно равен площади под кривой 2. Поэтому работа газа за весь цикл численно равна разности площадей под кривой 1 и под кривой 2, то есть площади цикла.

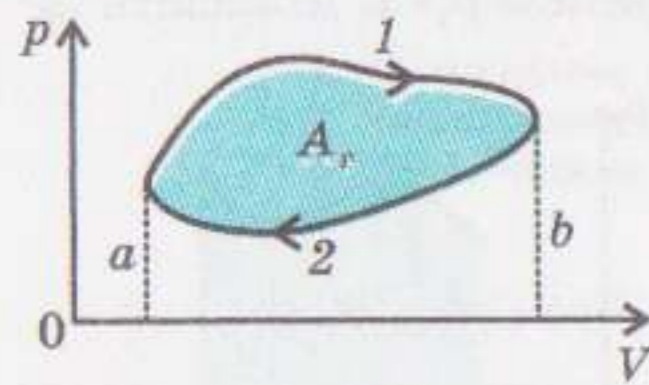


Рис. 34.5. Циклический процесс как последовательность двух процессов

В процессе 1 происходит расширение газа, а в процессе 2 — сжатие.

2. НАХОЖДЕНИЕ ПЕРЕДАННОГО ГАЗУ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Задача 4. ИЗОХОРНОЕ НАГРЕВАНИЕ ГАЗОВ

В двух закрытых стеклянных колбах при одинаковой температуре находятся равные массы гелия и неона. Температуру в обоих сосудах повысили на одну и ту же величину. Какому из газов сообщили большее количество теплоты? Во сколько раз больше? Молярные массы гелия и неона $M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $M_{\text{Ne}} = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Решение

Согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A_r$. В данном случае процесс происходит при постоянном объеме (закрытые стеклянные колбы). Поэтому работа газа равна нулю и, следовательно, $Q = \Delta U$. Так как внутренняя энергия одноатомного газа $U = \frac{3}{2} \nu RT$, то $Q = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$. Поскольку температура газов изменилась на одну и ту же величину, то $\frac{Q_{\text{He}}}{Q_{\text{Ne}}} = \frac{\nu_{\text{He}}}{\nu_{\text{Ne}}}$. Количество вещества $\nu = \frac{m}{M}$, где m — масса газа, M — его молярная масса.

По условию массы газов равны, поэтому $\frac{\nu_{\text{He}}}{\nu_{\text{Ne}}} = \frac{M_{\text{Ne}}}{M_{\text{He}}}$.

Следовательно, $\frac{Q_{\text{He}}}{Q_{\text{Ne}}} = \frac{M_{\text{Ne}}}{M_{\text{He}}} = 5$.

Почему же для нагревания гелия потребовалось в 5 раз большее количество теплоты, чем для нагревания неона? Дело в том, что при одинаковом изменении температуры средняя энергия молекул в обоих газах увеличилась на одну и ту же величину. А при равной массе газов в сосуде с гелием содержится в 5 раз больше молекул, чем в сосуде с неоном, так как масса одной молекулы гелия в 5 раз меньше массы одной молекулы неона.

Задача 5. ИЗОХОРНОЕ И ИЗОБАРНОЕ НАГРЕВАНИЕ

Одну и ту же массу одноатомного идеального газа нагревают один раз при постоянном объеме, а другой раз — при постоянном давлении. В каком случае газу передается большее количество теплоты, если изменение температуры ΔT в обоих случаях одинаково? Во сколько раз оно больше?

Решение

Ответим сначала на первый вопрос.

Так как изменение температуры газа в обоих случаях одинаково, его внутренняя энергия в обоих случаях увеличивается на одну и ту же величину (напомним, что внутренняя энергия газа зависит только от температуры).

Если нагревание происходит при постоянном объеме, то газ не совершает работы, и поэтому все подведенное к газу количество теплоты идет только на увеличение его внутренней энергии. В случае же нагревания при постоянном давлении газ расширяется и, следовательно, сообщаемое газу тепло идет не только на увеличение его внутренней энергии, но и на совершение работы. Поэтому в случае изобарного процесса надо подвести к газу большее количество теплоты.

Чтобы ответить на второй вопрос в условии задачи, запишем первый закон термодинамики $Q = \Delta U + A_r$ применительно к обоим процессам.

Для изохорного процесса $A_r = 0$, поэтому $Q_1 = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$.

Для изобарного процесса $Q_2 = \Delta U + A_r = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + p \Delta V$. Согласно уравнению состояния газа $pV = \nu RT$, поэтому $p \Delta V = \nu R \Delta T$. Таким образом, $Q_2 = \Delta U + A_r = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + \nu R \Delta T = \frac{5}{2} \nu R \Delta T$. Итак, $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{5}{3}$.

Отсюда следует, что при изобарном процессе $\frac{3}{5}$ подведенного к газу количества теплоты идет на увеличение внутренней энергии газа, а $\frac{2}{5}$ — на совершение работы.

3. ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Задача 6. ПРОСТЕЙШИЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

С некоторой массой идеального газа осуществляется циклический процесс $a - b - c - d - a$, состоящий из двух изобар и двух изохор (рис. 34.6). На каких этапах процесса газ получает тепло, а на каких — отдает? Какое количество теплоты больше — полученное или отданное? На сколько больше?

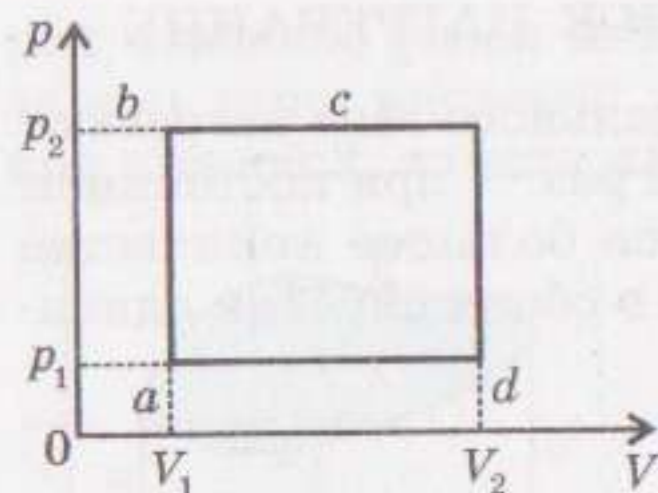


Рис. 34.6. Циклический процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар

Решение

Работа газа на этапе $a - b$ равна нулю, так как объем газа не изменяется. Внутренняя же энергия газа на этом этапе увеличивается, так как при изохорном повышении давления температура газа (и, следовательно, его внутренняя энергия) увеличивается. Таким образом, на этапе $a - b$ $\Delta U > 0$, $A_r = 0$, откуда следует, что $Q_{a-b} > 0$.

Работа газа на этапе $b - c$ положительна, так как газ расширяется. Внутренняя энергия на этом этапе увеличивается, так как при изобарном расширении температура газа (и, следовательно, его внутренняя энергия) увеличивается. Таким образом, на этапе $b - c$ $A_r > 0$, $\Delta U > 0$, откуда следует, что $Q_{b-c} > 0$.

Рассуждая аналогично, получаем, что на этапе $c - d$ $\Delta U < 0$, $A_r = 0$, поэтому $Q_{c-d} < 0$. На этапе $d - a$ $\Delta U < 0$, $A_r = 0$, поэтому $Q_{d-a} < 0$.

Чтобы определить, какое количество теплоты больше — полученное газом за весь цикл или отданное газом, — применим первый закон термодинамики $Q = \Delta U + A_r$ ко всему циклу в целом. После завершения цикла газ возвращается в исходное состояние, поэтому изменение его внутренней энергии равно нулю: $\Delta U = 0$. Значит, $Q = A_r$. Газ совершил за цикл *положительную* работу, численно равную площади, заключенной внутри цикла в координатах p, V (см. задачу 3). Следовательно, полученное газом количество теплоты больше, чем отданное им, на величину $Q = A_r = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$.

Заметим, что газ получает тепло только на этапах $a - b$ и $b - c$. Это понадобится нам при решении следующей задачи.

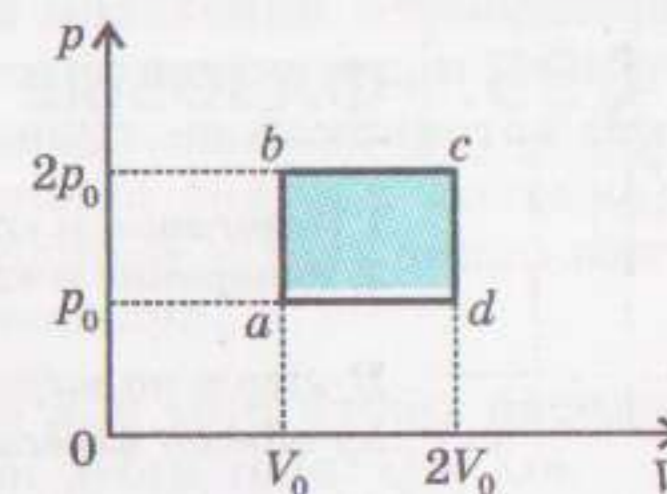
Задача 7. ВЫЧИСЛЕНИЕ КПД

На рис. 34.7 изображен циклический процесс для некоторой массы одноатомного идеального газа. Вычислите КПД цикла.

Согласно определению коэффициент полезного действия $\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{Q}$, где $A_{\text{пол}}$ — полезная работа, совершенная газом за цикл, а Q — количество теплоты, полученное газом. Полезная работа, согласно решению задачи 3, численно равна площади, ограниченной циклом. В данном случае $A_{\text{пол}} = p_0 V_0$.

Рис. 34.7. Циклический процесс, для которого требуется определить КПД

Газ получал тепло на этапах $a - b$ и $b - c$. Совершенная газом работа численно равна площади, ограниченной циклом.



При решении предыдущей задачи мы установили, что газ получает тепло только на этапах $a - b$ и $b - c$. Применим к каждому из этих этапов первый закон термодинамики. В изохорном процессе $a - b$ $A_r = 0$, поэтому $Q_{a-b} = \Delta U_{a-b} = U_b - U_a$. Внутренняя энергия одноатомного идеального газа $U = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} pV$, следовательно, $Q_{a-b} = U_b - U_a = \frac{3}{2} (2p_0 V_0 - p_0 V_0) = \frac{3}{2} p_0 V_0$.

В изобарном процессе $b - c$ газ совершает работу, а его температура и, следовательно, внутренняя энергия увеличиваются. Поэтому $Q_{b-c} = A_{b-c} + \Delta U_{b-c} = 2p_0 V_0 + \frac{3}{2} (2p_0 \cdot 2V_0 - p_0 \cdot 2V_0) = 5p_0 V_0$.

Отсюда $Q = Q_{a-b} + Q_{b-c} = \frac{3}{2} p_0 V_0 + 5p_0 V_0 = \frac{13}{2} p_0 V_0$. Следовательно, $\eta = \frac{p_0 V_0}{\frac{13}{2} p_0 V_0} \cdot 100\% = \frac{2}{13} \cdot 100\% \approx 15\%$.

Итак, КПД данного цикла равен примерно 15%.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1*. Данная масса газа сначала изобарно расширилась так, что объем газа увеличился от V_0 до $2V_0$, а затем изобарно расширилась до объема $4V_0$. На каком из этих этапов работа газа была больше? Во сколько раз больше?
- 2*. Приведите пример, когда газ совершает работу, причем его внутренняя энергия увеличивается.
- 3*. В двух запаянных металлических сосудах при одинаковой температуре находятся равные массы водорода и кислорода. Температуру в обоих сосудах повысили на одну и ту же величину. Какому из газов сообщили большее количество теплоты? Во сколько раз больше?
- 4*. Почему при изобарном нагревании газу передают большее количество теплоты, чем при изохорном? Изменение температуры в обоих случаях одинаково.

§ 35. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

1. Плавление и кристаллизация
2. Испарение и конденсация

В этом параграфе мы рассмотрим превращения вещества из одного агрегатного состояния в другое.

Мы расскажем также, чем кипение отличается от испарения и почему роса выпадает в предутренние часы.

1. ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Переход вещества из кристаллического состояния в жидкое называется *плавлением*.

Обратный процесс, при котором вещество переходит из жидкого состояния в кристаллическое, называется *кристаллизацией* или *отвердеванием*.

Температура плавления

Измерения показывают, что температура тела в течение всего процесса плавления остается постоянной. Эта температура называется *температурой плавления*.

Именно благодаря постоянству температуры в процессе плавления температуру плавления льда (или, что то же самое, температуру замерзания воды) и выбрали в качестве одной из опорных точек температурной шкалы Цельсия.

Температуры плавления для различных веществ могут различаться на тысячи градусов.

Примеры

Как известно, вода замерзает, а лед плавится при 0 °С.

Очень низкие температуры плавления у веществ, которые мы привыкли считать газами: например, водород плавится при -259 °С, а кислород — при -218 °С.

Железо плавится при 1539 °С, а наиболее тугоплавкий металл — вольфрам — имеет температуру плавления 3387 °С. Однако всем известен и металл, который остается жидким даже при комнатной температуре, — это ртуть (ее температура плавления равна -39 °С).

Удельная теплота плавления

Опыт показывает: чтобы расплавить кристаллическое тело, недостаточно только нагреть его до температуры плавления — к нему надо *продолжать* подводить тепло до *полного* превращения в жидкость.

Поскольку в течение всего процесса плавления температура тела остается *постоянной*, можно сделать вывод, что при плавлении средняя кинетическая энергия молекул не изменяется (см. § 28. *Температура и средняя кинетическая энергия молекул*). Следовательно, при плавлении все подводимое к телу тепло идет на увеличение потенциальной энергии молекул.

Количество теплоты Q , необходимое для того чтобы расплавить тело, пропорционально массе m этого тела: $Q = \lambda m$.

Величину λ называют *удельной теплотой плавления*.

Удельная теплота плавления численно равна количеству теплоты, необходимому для того чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления.

Пример

Чтобы расплавить 1 кг льда, надо затратить примерно такое же количество теплоты, как и для нагревания получившейся в результате таяния воды до 80 °С (хотя при таянии льда его температура остается все время неизменной!).

Вот что писал об удельной теплоте плавления шотландский ученый Дж. Блэк:

«Если бы лед не обладал большой теплотой плавления, весной вся масса льда должна была бы растаять за несколько минут или секунд, так как теплота непрерывно передается льду из воздуха. Последствия этого были бы ужасны; ведь и при существующем положении возникают большие наводнения и сильные потоки воды при таянии больших масс льда и снега».

2. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

ИСПАРЕНИЕ

Процесс превращения жидкости в пар называется *парообразованием*.

Если парообразование происходит со свободной поверхности жидкости, оно называется *испарением*.

Испарение происходит при любой температуре: например, вода постепенно «улетучивается» из открытого сосуда, а лужи после дождя высыхают.

Могут ли испаряться твердые тела?

Как известно, замерзшее на морозе белье высыхает: лед испаряется, то есть превращается в пар, минуя жидкое состояние (воду). Можно заметить также, как из твердого состояния в газообразное превращается йод: желтое пятно от йода светлеет и со временем исчезает.

Однако лед и йод не являются исключениями: опыты показывают, что испаряются все твердые тела, но большинство из них испаряется настолько медленно, что мы этого не замечаем.

Почему жидкость при испарении охлаждается?

При испарении из жидкости вылетают наиболее быстрые молекулы: их кинетическая энергия такова, что они могут вырваться из жидкости, несмотря на притяжение других молекул. В результате *средняя* кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается. А так как температура пропорциональна средней кинетической энергии молекул, то жидкость при испарении охлаждается.

Чем быстрее испаряется жидкость, тем сильнее она охлаждается. Потрите руку ваткой, смоченной в воде, а затем — ваткой, смоченной в одеколоне: во втором случае ощущение прохлады будет сильнее, потому что одеколон испаряется быстрее, чем вода.

Всем знакомо ощущение прохлады при выходе из воды после купания. При ветре это ощущение прохлады значительно усиливается, потому что испарение происходит быстрее.

Удельная теплота парообразования

Чтобы температура жидкости при испарении не уменьшалась, надо подводить к жидкости тепло. При этом все подводимое тепло идет на увеличение потенциальной энергии вылетающих из жидкости молекул, то есть на разрыв связей между молекулами.

Количество теплоты Q , необходимое для того чтобы превратить жидкость в пар при постоянной температуре, пропорционально массе m жидкости: $Q = Lm$.

Величина L называется *удельной теплотой парообразования*.

Удельная теплота парообразования численно равна количеству теплоты, необходимому для того чтобы обратить в пар 1 кг жидкости при неизменной температуре.

Пример

Для превращения одного литра воды в пар необходимо затратить столько же энергии, сколько нужно для подъема слона на двадцать этажей. А ведь летом после дождя лужи высыхают менее чем за час!

Процесс, противоположный процессу парообразования, то есть превращение пара в жидкость, называют *конденсацией*. При конденсации теплота не поглощается, а выделяется: при конденсации 1 кг пара выделяется количество теплоты, численно равное L .

НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Динамическое равновесие

Хорошо известно, что если сосуд с жидкостью плотно закрыт, уровень жидкости в сосуде остается неизменным. Означает ли это, что процесс испарения в закрытом сосуде не идет?

Конечно, нет: ведь в жидкости по-прежнему есть «быстрые» молекулы, которые непрерывно вылетают из нее.

Но дело в том, что одновременно с испарением всегда идет и противоположный процесс — конденсация: из пара, находящегося над поверхностью жидкости, молекулы влетают обратно в жидкость.

Если уровень жидкости со временем не изменяется, это означает, что процессы испарения и конденсации идут *с одинаковой скоростью*: каждую секунду из жидкости вылетает в среднем столько же молекул, сколько и влетает в жидкость.

В таком случае говорят, что жидкость и пар находятся в *динамическом равновесии*.

Насыщенный пар

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным паром*. На рисунке 35.1 схематически изображены процессы испарения и конденсации в случае насыщенного пара.



Рис. 35.1. Насыщенный пар над поверхностью жидкости в закрытом сосуде

Испарение и конденсация идут с одинаковой скоростью. Уровень жидкости не изменяется со временем.

Именно насыщенный пар и находится над поверхностью жидкости в плотно закрытом сосуде — поэтому уровень жидкости в сосуде остается постоянным.

Ненасыщенный пар

Если сосуд с жидкостью открыть, пар начнет выходить наружу. Его концентрация в сосуде уменьшится, и вследствие этого молекулы пара будут влетать в жидкость реже, то есть процесс

конденсации замедлится. А поскольку процесс испарения продолжает идти с прежней скоростью, уровень жидкости в сосуде начнет понижаться.

Если процесс испарения идет быстрее, чем процесс конденсации, говорят, что над жидкостью находится *ненасыщенный* пар. На рис. 35.2 схематически изображены процессы испарения и конденсации в случае ненасыщенного пара.

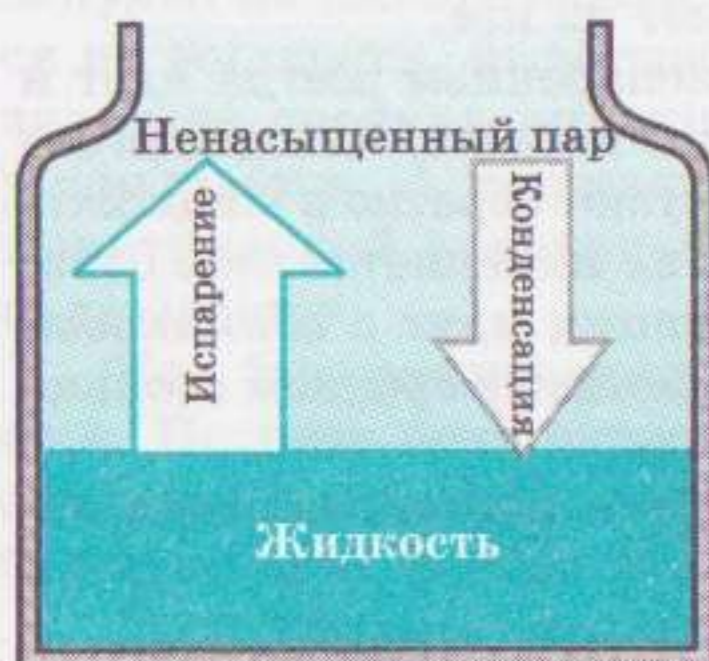


Рис. 35.2. Ненасыщенный пар над поверхностью жидкости в открытом сосуде

Конденсация идет медленнее, чем испарение. Уровень жидкости понижается.

Над морями и океанами находится обычно ненасыщенный пар, то есть испарение преобладает над конденсацией. Поднимающийся вверх пар охлаждается и конденсируется, образуя облака и тучи. Они превращаются в дождевые тучи и проливаются дождями.

А реки потом сносят воду обратно в моря и океаны.

Кипение

В жидкости всегда есть маленькие пузырьки воздуха. Жидкость испаряется внутрь этих пузырьков, в результате чего пар внутри пузырьков становится насыщенным. Если давление насыщенного пара меньше давления внутри жидкости (для неглубоких сосудов оно практически равно атмосферному), эти пузырьки не смогут увеличиваться, то есть парообразование будет происходить только со свободной поверхности жидкости.

Однако давление насыщенного пара быстро увеличивается с ростом температуры: ведь чем выше температура, тем больше средняя кинетическая энергия молекул и, следовательно, большая их доля может вырваться из жидкости, преодолев притяжение других молекул. Если нагревать жидкость, то при некоторой температуре давление насыщенного пара станет равным давлению в жидкости (примерно равным атмосферному) и начнется интенсивное испарение жидкости внутрь пузырьков. Наполняясь паром, пузырьки будут быстро расти, подниматься вверх и лопаться на поверхности жидкости. Эта картина хорошо всем знакома — речь идет о *кипении*.

Итак, кипение жидкости происходит при температуре, при которой давление насыщенного пара становится равным внешнему давлению. Эта температура называется *температурой кипения*.

Температура кипения воды при атмосферном давлении равна $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Может ли вода кипеть при температуре, отличной от $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Так как давление насыщенного пара с ростом температуры повышается, то, увеличивая внешнее давление, можно повысить и температуру кипения. На этом основано действие кастрюль-скаороварок: в них создается давление, которое в 2 раза больше атмосферного, вследствие чего температура кипения повышается до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это ускоряет приготовление пищи в несколько раз.

При уменьшении же внешнего давления температура кипения понижается. Например, в горах, где давление меньше, чем на уровне моря, вода кипит при температуре ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: на высоте 5 км — при температуре $83\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так что сварить мясо в горах — непростая задача!

Поставим опыт

Доведем воду в колбе до кипения и плотно закроем колбу. Когда вода немного остынет, перевернем колбу и начнем поливать дно колбы холодной водой. Вода в колбе закипит, хотя ее температура существенно ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 35.3).

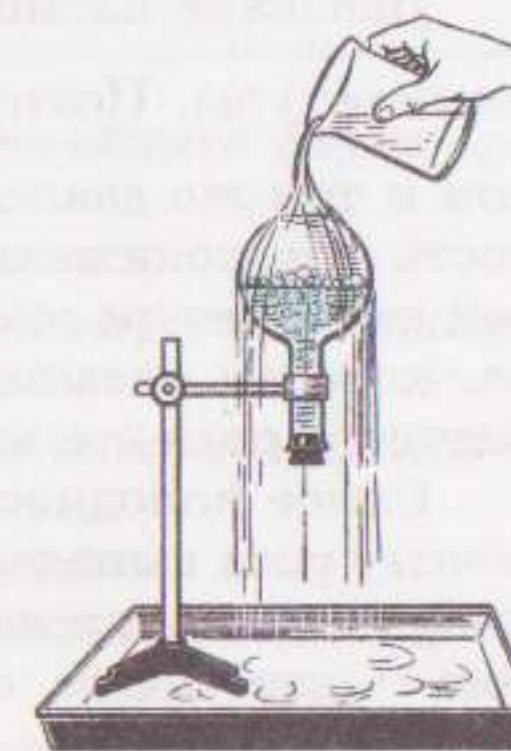


Рис. 35.3. Кипение воды при пониженном давлении

При охлаждении водяной пар над поверхностью воды сконденсировался, в результате чего давление в колбе резко упало. А при пониженном давлении вода кипит при температуре ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Влажность

Содержание водяного пара в воздухе характеризуют давлением, которое оказывал бы этот пар, если бы других газов не было.

Например, давление насыщенного водяного пара при комнатной температуре составляет около 2% от обычного атмосферного давления.

Давление ненасыщенного пара меньше, чем давление насыщенного. Поэтому степень насыщенности водяного пара можно определить как отношение давления водяного пара к давлению насыщенного пара при той же температуре.

Эта величина, выраженная в процентах, называется относительной влажностью и обозначается φ . Итак,

относительная влажность $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$, где p — давление водяного пара при данной температуре, p_n — давление насыщенного пара при той же температуре.

Комфортные условия для человека соответствуют влажности около 50—60%.

Влажность измеряют с помощью специальных приборов, один из которых называется *психрометром* (см. лабораторную работу № 9 в разделе *Лабораторные работы*). Психрометр состоит из двух термометров: сухого и влажного. Из-за испарения воды влажный термометр обычно показывает более низкую температуру, чем сухой: чем ниже относительная влажность, тем больше разность показаний термометров. На основе этих показаний с помощью заранее составленной таблицы определяется относительная влажность воздуха.

Почему роса выпадает в предутренние часы?

Давление насыщенного пара p_n уменьшается при понижении температуры. Поэтому согласно формуле $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$ при одном и том же давлении водяного пара p его относительная влажность при понижении температуры увеличивается и при некоторой температуре может стать равной 100%. При этой температуре, которая называется *точкой росы*, начинается конденсация водяного пара, то есть выпадает роса.

Самое холодное время суток — это предутренние часы. Вот почему роса выпадает перед восходом солнца. И летним утром мы любуемся искрящимися капельками росы на траве, а зимним утром — деревьями, одетыми в кружева инея (инея — это замерзшая роса).

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Переход вещества из кристаллического состояния в жидкое называют *плавлением*. Обратный процесс, когда вещество переходит из жидкого состояния в кристаллическое, называют *кристаллизацией*. Количество теплоты Q , необходимое

для того, чтобы расплавить тело, пропорционально массе m этого тела: $Q = \lambda m$. Величину λ называют *удельной теплотой плавления*.

- Процесс превращения жидкости в пар называют *парообразованием*. Количество теплоты Q , необходимое для того чтобы превратить жидкость в пар при той же температуре, пропорционально массе m жидкости: $Q = Lm$. Величину L называют *удельной теплотой парообразования*.
- Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют *насыщенным паром*.
- *Кипение* жидкости происходит при температуре, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению. Эту температуру называют температурой кипения. Температура кипения воды при атмосферном давлении равна 100 °С.
- *Относительной влажностью* φ воздуха называют отношение давления p водяного пара при данной температуре к давлению p_n насыщенного пара при той же температуре, выраженному в процентах: $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое плавление и кристаллизация? Что общего у этих процессов и чем они отличаются?
2. Что такое удельная теплота плавления?
3. Что такое испарение и конденсация? Что общего у этих процессов и чем они отличаются?
4. Что общего у плавления и испарения и чем они отличаются?
5. Почему жидкость при испарении охлаждается?
6. Что такое удельная теплота парообразования?
7. Какова температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении?
- 8*. Почему для испарения жидкости при постоянной температуре к жидкости надо все время подводить тепло?
- 9*. Что такое насыщенный пар? Чем он отличается от ненасыщенного?
- 10*. Что такое кипение? Чем оно отличается от испарения? Что общего у этих процессов?
- 11*. Может ли вода кипеть при температуре, отличной от 100 °С? Приведите примеры, иллюстрирующие ваш ответ.
- 12*. Что такое относительная влажность?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Внутренняя энергия** — это сумма кинетической энергии хаотического движения всех частиц, входящих в состав данного тела, и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом.
- Внутреннюю энергию тела можно изменить посредством **теплопередачи** без совершения работы (при контакте тел различной температуры) и посредством **совершения работы**.
- **Первый закон термодинамики**: изменение внутренней энергии тела равно сумме количества теплоты, переданного телу, и работы, совершенной над телом: $\Delta U = Q + A$. Другая формулировка: количество теплоты, переданное телу, равно сумме изменения внутренней энергии тела и работы, совершенной телом: $Q = \Delta U + A_r$.
- **Основные элементы теплового двигателя**: рабочее тело, нагреватель и холодильник. Полезная работа, совершаемая тепловым двигателем, $A_n = Q_1 - Q_2$, где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику. **Коэффициент полезного действия** теплового двигателя: $\eta = \frac{A_n}{Q_1} \cdot 100\%$. Максимально возможный КПД теплового двигателя: $\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$.
- **Второй закон термодинамики** (в формулировке Клаузиуса): невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача теплоты от холодного тела к горячему. Отсюда следует, что механическая работа не может совершаться только за счет охлаждения какого-либо тела.
- Для уменьшения вредных воздействий тепловых двигателей на окружающую среду повышают КПД двигателей, уменьшают выброс вредных веществ и используют **энергосберегающие технологии**.

- Переход вещества из кристаллического состояния в жидкое называют **плавлением**. Обратный процесс, когда вещество переходит из жидкого состояния в кристаллическое, называют **кристаллизацией**. Количество теплоты Q , необходимое для того чтобы расплавить тело, пропорционально массе m этого тела: $Q = \lambda m$. Величину λ называют **удельной теплотой плавления**.
- Процесс превращения жидкости в пар называют **парообразованием**. Количество теплоты Q , необходимое для того, чтобы превратить жидкость в пар при той же температуре, пропорционально массе m жидкости: $Q = Lm$. Величину L называют **удельной теплотой парообразования**.
- Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.
- **Кипение** жидкости происходит при температуре, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению. Эту температуру называют температурой кипения. Температура кипения воды при атмосферном давлении равна 100°C .
- **Относительной влажностью** φ воздуха называют отношение давления p водяного пара при данной температуре к давлению p_n насыщенного пара при той же температуре, выраженному в процентах: $\varphi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «ТЕРМОДИНАМИКА»

1. В жаркий день хозяйка решила оставить на кухне включенный холодильник открытым, чтобы он «охлаждал кухню». Действительно ли в кухне станет прохладнее?
2. Станет ли коэффициент полезного действия теплового двигателя равным 100% , если исчезнет трение между частями машины?
3. Газ изотермически сжимается. Отдает или получает он при этом некоторое количество теплоты?

4. В каком случае при нагревании газа надо передать ему большее количество теплоты — при изобарном или изохорном процессе? Обоснуйте ваш ответ.
5. В каком процессе все количество теплоты, переданное газу, превращается в работу?
6. Газу передается некоторое количество теплоты. Может ли температура газа при этом понижаться?
7. Почему капля воды, попав на раскаленную сковороду, не испаряется сразу, а начинает подпрыгивать?
8. Влияет ли ветер на показания влажного термометра? сухого? Термометры находятся в тени.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Глава 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



В этой главе мы рассмотрим природу электрических взаимодействий и проследим, как развивалась наука об электричестве.

Далее мы рассмотрим взаимодействие покоящихся заряженных тел (раздел физики, в котором изучают такие взаимодействия, называют электростатикой).

Электрические взаимодействия играют исключительно большую роль в строении атома и образовании молекул. Они проявляют себя и в механике «под видом» уже знакомых вам силы упругости и силы трения.

§ 36. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

1. От электрона-янтаря до электрона-частицы
2. Роль электрических взаимодействий

Мы расскажем здесь о двухтысячелетнем пути, пройденном учеными при изучении природы электричества — от электрона-янтаря до электрона-частицы.

Вы узнаете также о роли электрических взаимодействий в строении вещества.

1. ОТ ЭЛЕКТРОНА-ЯНТАРЯ ДО ЭЛЕКТРОНА-ЧАСТИЦЫ

«ЖИВОЙ КАМЕНЬ» И «ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИЛА»

Делая украшения из янтаря, древние греки обнаружили, что, когда янтарь натерли, чтобы придать ему блеск, он начинал притягивать мелкие предметы — пушинки, волосы, перья. Греки называли янтарь «электроном» — от этого названия впоследствии и произошло слово «электричество».

Чтобы повторить описанный опыт древних греков, сегодня не нужен янтарь: достаточно расчесать, например, сухие волосы пластмассовой расческой, и она начнет притягивать кусочки бумаги (рис. 36.1). Как вы уже знаете, дело в том, что расческа приобрела электрические заряды, то есть *наэлектризовалась*.

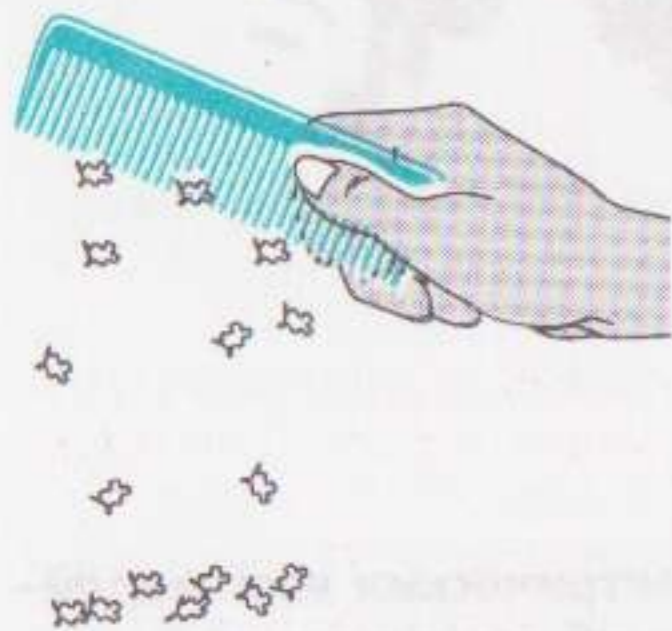


Рис. 36.1. После расчесывания пластмассовая расческа притягивает легкие кусочки бумаги

Может возникнуть вопрос: почему *заряженная* расческа притягивает *незаряженные* кусочки бумаги? Ответ на него мы найдем в § 39. *Проводники и диэлектрики в электростатическом поле.*

Притяжение легких предметов натертым янтарем стало одним из первых замеченных людьми примеров «действия на расстоянии». Действие на расстоянии представлялось удивительным: ведь все остальные предметы, казалось, взаимодействовали только при

непосредственном контакте (напомним, что притяжение тел Землей — не говоря уже о притяжении планет Солнцем — долго не осознавалось как действие на расстоянии).

В 16-м веке английский ученый Уильям Гилберт обнаружил, что «притягательной» силой обладает не только янтарь: после натирания многие вещества, например алмаз, горный хрусталь, сера, смола, также притягивают легкие предметы. И Гилберт назвал эту «притягательную силу» *электрической* — в честь электрона-янтаря, у которого она была обнаружена впервые.

В школьных опытах электризацию производят, натирая шерстью эбонитовую¹ палочку или шелком — стеклянную.

ДВА ЗНАКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

В 17-м веке немецкий ученый Отто фон Герике обнаружил, что электрическое взаимодействие может быть не только *притяжением*, но и *отталкиванием*: ученый заметил, что, коснувшись натертого шара из серы, пушинка начинает отталкиваться от него.

Убедиться в существовании электрического отталкивания можно с помощью простого опыта (рис. 36.2).

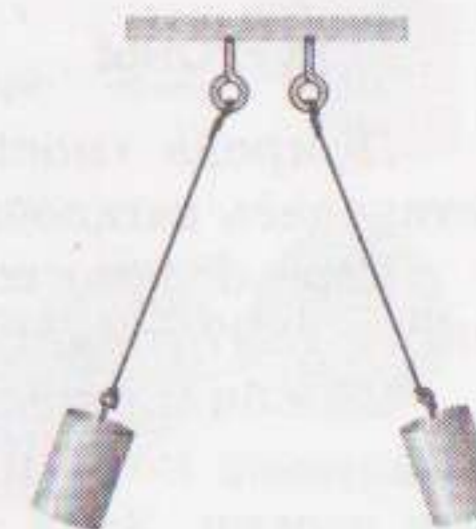


Рис. 36.2. Отталкивание одноименно заряженных тел

Если прикоснуться натертой стеклянной палочкой к подвешенным рядом гильзам из фольги, они начнут отталкиваться друг от друга.

Правда, и тут возникает вопрос: почему электрическое отталкивание было обнаружено только через две тысячи лет после электрического притяжения?

Дело в том, что *незаряженные* предметы всегда *притягиваются* к заряженным. Причину этого мы объясним в § 39. *Проводники и диэлектрики в электростатическом поле.*

В начале 18-го века французский ученый Шарль Дюфе объяснил притяжение и отталкивание наэлектризованных тел существованием *двух типов электрических зарядов*: если тела имеют электрические заряды одного и того же типа, они отталкиваются, а если разных типов, то притягиваются.

Американский ученый Бенджамин Франклин² предложил назвать электрические заряды одного типа *положительными*,

¹ Эбонит — твердое вещество черного цвета, состоящее из серы и каучука.

² Б. Франклин был также выдающимся государственным деятелем.

а другого типа — *отрицательными*. Обосновывал он это тем, что тела, обладающие зарядами *разных* типов, могут при контакте друг с другом полностью *разрядиться*, то есть потерять заряды. А это напоминало сложение равных по модулю чисел разных знаков, когда в результате получается нуль.

Выбор, какой именно заряд считать положительным, Франклин сделал в значительной степени произвольно. И, как мы покажем ниже, этот выбор оказался не совсем удачным.

Если тела имеют заряд одного и того же типа, их называют заряженными *одноименно*: при этом либо оба тела имеют положительный заряд, либо оба — отрицательный. Если же тела имеют заряды разных типов, их называют заряженными *разноименно*: при этом одно тело всегда имеет положительный заряд, а другое — отрицательный.

Таким образом, мы можем обобщить опытные данные о взаимодействии заряженных тел следующим образом:

одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименно заряженные — притягиваются.

ЭЛЕКТРОНЫ

Природа «носителей» электрических зарядов долгое время оставалась загадочной.

Первый шаг к ее разгадке сделал английский ученый Дж. Дж. Томсон¹ в 1897 году.

Он обнаружил, что при мощных электрических разрядах возникают потоки чрезвычайно легких электрически заряженных частиц. Знак заряда этих частиц, исходя из уже сделанного Франклином выбора знаков зарядов, следовало считать *отрицательным*.

Открытую Томсоном частицу в честь электрона-янтаря — «первого электрического вещества» — назвали *электроном*. Электрон явился первой из открытых учеными *элементарных частиц*, то есть мельчайших частиц вещества².

Следующий шаг к разгадке природы электричества сделал в начале 20-го века английский ученый Эрнест Резерфорд.

Исследуя строение атома, он доказал, что в центре атома находится очень малое положительно заряженное ядро, в котором

¹ Оба инициала этого ученого, Джозефа Джона Томсона, указаны для того, чтобы отличить его от другого известного ученого, Джорджа Паджета Томсона, сына Дж. Дж. Томсона. Каждый из них удостоился Нобелевской премии: первый — за открытие электрона.

² Более подробно об элементарных частицах будет рассказано в курсе физики 11-го класса.

сосредоточена почти вся масса атома, а отрицательно заряженные электроны движутся вокруг ядра.

Так выяснилось, где внутри вещества сосредоточены положительные и отрицательные заряды: положительные — в ядрах атомов, а отрицательные — в электронах.

Кроме того, стало ясно, как велика роль электрических взаимодействий в строении вещества: оказалось, что существование атомов обеспечивается электрическим притяжением электронов к ядру.

Более подробно об опытах Резерфорда и строении атома будет рассказано в курсе физики 11-го класса.

Как происходит электризация тел?

Наиболее удаленные от ядра электроны сравнительно слабо связаны с ядром, вследствие чего при тесном контакте двух тел электроны могут переходить с одного тела на другое (рис. 36.3).

Этим и объясняется, почему при трении тела электризуются: трение обеспечивает тесный контакт между телами.



Рис. 36.3. Механизм электризации трением

При электризации в одном теле возникает избыток электронов, и поэтому оно приобретает отрицательный электрический заряд, а в другом теле возникает недостаток электронов, вследствие чего оно приобретает положительный заряд.

НОСИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Электрический заряд переносят только заряженные частицы: *электрического заряда без частиц не существует*. Заряженные частицы называют *носителями электрического заряда*. Помня об этом, мы будем, однако, для краткости называть иногда заряженные частицы просто *зарядами*.

Наиболее «активный» носитель электрического заряда — электрон, что обусловлено прежде всего его малой массой. Например, электроны являются носителями заряда в металлах.

Переносить электрический заряд могут и *ионы*¹ — атомы, потерявшие или приобретшие один или несколько электронов. Потерявший электрон (электроны) атом становится положительно заряженным ионом, а приобретший — отрицательно заряженным.

Например, в растворе поваренной соли (химическая формула NaCl) носителями электрического заряда являются положительно заряженные ионы натрия и отрицательно заряженные ионы хлора.

Направление электрического тока и направление движения электронов

Мы уже упоминали, что сделанный Франклином выбор знаков электрических зарядов оказался не совсем удачным. Объясним, с чем это связано.

Как выяснилось уже в 20-м веке, носителями заряда в металлах являются *электроны*, заряд которых «по Франклину» следовало считать *отрицательным*. За направление же электрического тока было выбрано направление движения *положительно* заряженных частиц. И поэтому получилось, что условно выбранное направление тока *противоположно* направлению движения носителей заряда в металлах (рис. 36.4). А наиболее распространенными проводниками являются именно металлы.



Рис. 36.4. Электроны в металле движутся противоположно условно выбранному направлению тока

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

При электризации двух тел *общее* количество электронов в этих телах остается неизменным. Поэтому положительный заряд, приобретаемый одним из тел, равен по модулю отрицательному заряду, приобретаемому другим телом. В этом выражается

закон сохранения электрического заряда: в электрически изолированной² системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается неизменной.

¹ От греческого «ион» — странник.

² Электрически изолированной называется система, в которую не входят и из которой не выходят заряженные частицы.

В 20-м веке выяснилось, что закон сохранения электрического заряда — один из наиболее фундаментальных законов природы (наряду с другими законами сохранения — такими, как законы сохранения энергии и импульса).

Закон сохранения электрического заряда выполняется и тогда, когда заряженные частицы испытывают превращения.

Так, при столкновении двух *нейтральных* (не имеющих электрического заряда) частиц могут рождаться *заряженные* частицы, однако алгебраическая сумма зарядов рожденных частиц при этом равна нулю: вместе с положительно заряженными частицами рождаются и отрицательно заряженные.

2. РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Как вы уже знаете, само существование атомов обусловлено электрическим взаимодействием положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. Однако взаимодействие ядер и электронов не может быть описано классической физикой. Оно описывается *квантовой механикой* — наукой о движении и взаимодействии мельчайших частиц вещества (подробнее об этом будет рассказано в курсе физики 11-го класса).

Электрическую природу имеет и взаимодействие атомов: благодаря ему атомы объединяются в молекулы (рис. 36.5), а из атомов и молекул образуются жидкие и твердые тела.

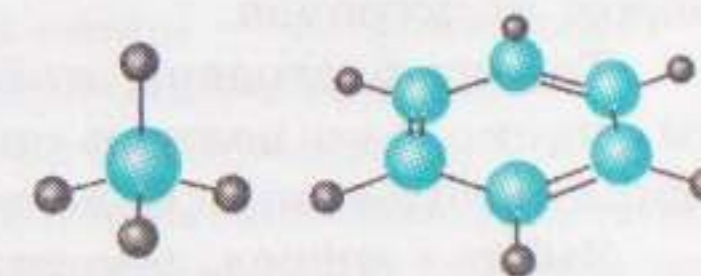


Рис. 36.5. Атомы объединяются в молекулы благодаря электрическим взаимодействиям

Электрическое взаимодействие нейтральных атомов объясняется неравномерным распределением электрического заряда в атомах. На очень малых расстояниях атомы отталкиваются (основную роль при этом играет взаимодействие одноименно заряженных электронов), но с увеличением расстояния отталкивание сменяется притяжением (так как большую роль начинают играть силы притяжения между электронами одного атома и ядром другого атома).

Отталкиванием атомов обусловлены жесткость твердых тел и малая сжимаемость жидкостей, а притяжением — прочность твердых тел на разрыв. Чтобы «почувствовать» силу электрических взаимодействий, попробуйте разорвать стальную проволоку сечением 1 мм². А ведь усилиям всего вашего тела противостоят силы

электрического взаимодействия крошечных частиц в малом сечении проволоки.

Электрическими взаимодействиями обусловлены и многие процессы в живых тканях. В частности, электрической является природа импульсов в нервных клетках, в том числе — в клетках головного мозга.

Заметим, что взаимодействие атомов и молекул также описывается не классической механикой, а квантовой.

ПОЧЕМУ ТАК РЕДКО ПРОЯВЛЯЕТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ?

Чтобы вы смогли представить себе, насколько велики силы электрического взаимодействия, приведем такой пример.

Если бы из одной капельки воды можно было забрать всего одну тысячную долю всех находящихся в ней электронов и передать их другой капельке, находящейся на расстоянии одного метра, то эти капельки стали бы притягиваться с силой, равной весу тысячи слонов.

Но если электрическое взаимодействие действительно так сильно, почему же его удалось заметить поначалу только как «дикуинку» — в виде крошечной силы, с которой натертые кусочки янтаря притягивают перышки и пушинки?

Ответ состоит в том, что практически все окружающие нас тела *электрически нейтральны*: огромный суммарный положительный электрический заряд атомных ядер в точности компенсируется равным ему по модулю суммарным отрицательным зарядом электронов.

Только благодаря этой точной компенсации мы и не замечаем, насколько велики силы электрического взаимодействия, «спрятанные» внутри вещества.

Забегая вперед, заметим, однако, что «электрические» силы — далеко не самые большие из известных нам: намного бóльшие силы «спрятаны» внутри атомных ядер! Это — так называемые *ядерные силы*. Подробнее мы расскажем о них в курсе физики 11-го класса.

А в следующем параграфе мы сравним силы электрического и гравитационного взаимодействий.

Проявляются ли электрические взаимодействия в механических явлениях?

Как вы помните, в механике рассматриваются три вида сил — сила тяготения, сила упругости и сила трения. Почему же при изучении механических явлений мы, казалось бы, не учитываем электрических взаимодействий?

Ответ состоит в том, что мы их всегда учитываем. Вспомним, что силы упругости и силы трения обусловлены взаимодействием атомов и молекул, из которых состоят тела, а взаимодействие атомов и молекул, как мы уже знаем, имеет электрическую природу.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- *Электрическое взаимодействие* заряженных тел обусловлено взаимодействием двух типов *электрических зарядов* — положительных и отрицательных. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.
- *Закон сохранения электрического заряда*: в электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается неизменной.
- *Носителями электрического заряда* являются заряженные частицы — *электроны* (в металлах) и *ионы* (например, в растворах солей).
- *Электрическими взаимодействиями* обусловлено строение атома и молекул. В механических явлениях электрические взаимодействия проявляют себя как силы упругости и силы трения.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем обусловлено взаимодействие электрически заряженных тел? В каком случае это притяжение, а в каком — отталкивание?
2. В чем проявляется сохранение электрического заряда?
3. Какие вам известны носители электрического заряда?
4. Что такое электризация тел? Как можно наэлектризовать тела?
5. Каков знак электрического заряда тела, в котором имеется избыток электронов?
6. Как связаны направление электрического тока и направление движения электронов в металле?
- 7*. Какова роль электрических взаимодействий в строении атома и образовании молекул?
- 8*. Проявляются ли электрические взаимодействия в механических явлениях?
- 9*. Атомы металлов, вступая в химические реакции, сравнительно легко отдают электроны. Какими ионами они при этом становятся — положительными или отрицательными?
- 10*. Носителями заряда в растворе поваренной соли являются ионы натрия и хлора. Какие из них переносят положительный заряд, а какие — отрицательный?

§ 37. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

1. Закон Кулона
2. Электрическое поле

В этом параграфе мы рассмотрим основной закон электростатики — закон Кулона, определяющий взаимодействие точечных электрических зарядов.

Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством электрического поля. Представление о поле ввел английский ученый Майкл Фарадей.

1. ЗАКОН КУЛОНА

ОПЫТ КУЛОНА

Заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними, называют *точечными зарядами*¹.

Закон взаимодействия точечных зарядов установил на опыте в конце 18-го века французский ученый Шарль Кулон.

На рис. 37.1 схематически изображена опытная установка Кулона, которую часто называют «крутильными весами».



Шарль Кулон
(1736—1806)

На тонкой упругой нити подвешен горизонтально легкий стержень, на одном конце которого укреплен заряженный шарик, а на другом — противовес в виде бумажного кружка.

¹ Точечный заряд — такая же полезная модель заряженного тела, как материальная точка — физического тела.

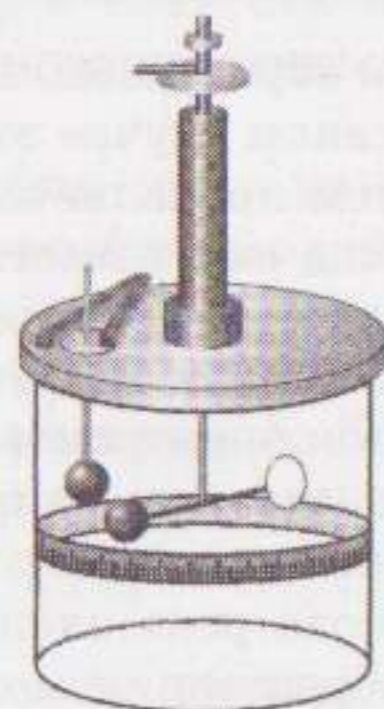


Рис. 37.1. Опытная установка Кулона

Второй одноименно заряженный шарик укреплен на вертикальном неподвижном стержне. Вследствие электрического отталкивания между шариками нить закручивается на некоторый угол, и по величине этого угла можно определить силу взаимодействия шариков.

ЗАКОН КУЛОНА

В результате поставленных опытов Кулон установил, что

неподвижные точечные заряды q_1 и q_2 действуют друг на друга в вакууме с силами, прямо пропорциональными модулям зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния r между зарядами. Модуль каждой силы $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$.

При этом, как мы уже знаем, одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Значение коэффициента пропорциональности k зависит от выбора системы единиц. Ниже мы приведем значение этого коэффициента в системе СИ.

В начале 20-го века английский ученый Эрнест Резерфорд, исследуя строение атома, установил на опыте, что заряженные частицы взаимодействуют с атомным ядром по закону Кулона. Так было доказано, что закон Кулона справедлив даже для взаимодействия мельчайших частиц вещества.

ЕДИНИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

В системе СИ единицей электрического заряда является 1 кулон (Кл). Эта единица определяется через единицу силы тока — ампер (А). О том, как определяется единица силы тока, будет рассказано в курсе физики 11-го класса.

Один кулон равен заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока в проводнике, равной одному амперу. Таким образом, $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

В системе СИ коэффициент $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$. Его иногда записывают в виде $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ — так называемая *электрическая постоянная*.

Велик ли заряд в 1 кулон?

Из закона Кулона следует, что два точечных заряда по 1 Кл каждый, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействовали бы с силой, равной $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$.

Чтобы представить себе эту огромную силу, прибегнем к сравнению: она равна весу груженого железнодорожного состава длиной примерно от Москвы до Санкт-Петербурга.

Теперь становится понятно, почему невозможно сообщить заряд 1 Кл телу «обычных» размеров: например, избыточные электроны, отталкиваясь с огромной силой друг от друга, просто разлетелись бы в стороны. Однако, несмотря на это, *протекание* заряда 1 Кл является совершенно заурядным событием: всего за несколько секунд такой заряд протекает через лампочку карманного фонарика.

Заметим, что тело очень больших размеров может иметь заряд намного больший, чем 1 Кл: например, заряд земного шара равен примерно 600 000 кулонов.

Сравнение закона Кулона с законом всемирного тяготения

Вы, наверное, заметили, что закон Кулона сходен с законом всемирного тяготения: напомним, что сила гравитационного притяжения материальных точек также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Однако между этими двумя важнейшими законами есть существенные различия.

1. Гравитационное взаимодействие всегда является *притяжением*, а электрическое взаимодействие может быть как *притяжением*, так и *отталкиванием*.

2. Электрическое взаимодействие несравненно *сильнее* гравитационного: например, сила электрического отталкивания двух электронов примерно в 10^{42} раз больше, чем сила их гравитационного притяжения. Число 10^{42} представить очень трудно: например, размеры нашей Галактики, содержащей сотни миллиардов звезд, больше размеров атома «всего» в 10^{31} раз: это в сто миллиардов раз меньше, чем 10^{42} .

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

Во многих опытах было установлено, что все известные элементарные частицы либо не имеют электрического заряда (такие частицы называются нейтральными), либо имеют заряд, кратный по модулю заряду электрона¹. Поэтому модуль заряда электрона назвали *элементарным электрическим зарядом*. Элементарный электрический заряд обозначают e .

Заряд электрона измерил в начале 20-го века американский физик Роберт Милликен.

¹ Есть основания считать, что некоторые элементарные частицы состоят из еще более «элементарных» частиц с дробными зарядами — так называемых кварков. Однако в свободном состоянии кварки не наблюдаются.

Он впрыскивал капельки масла между горизонтальными разноименно заряженными металлическими пластинами и затем наблюдал за движением капель. Когда капли облучали рентгеновскими лучами, они вырывали из капель один или несколько электронов, в результате чего эти капли приобретали электрический заряд. Заряженные капли взаимодействовали с заряженными пластинами, и скорость движения капель изменялась.

Например, если капля останавливалась, это означало, что действующая на нее электрическая сила уравнивает силу тяжести (рис. 37.2). Силу тяжести можно узнать, измерив плотность масла и радиус капельки. Следовательно, можно найти и электрическую силу, а вместе с нею и заряд капельки.

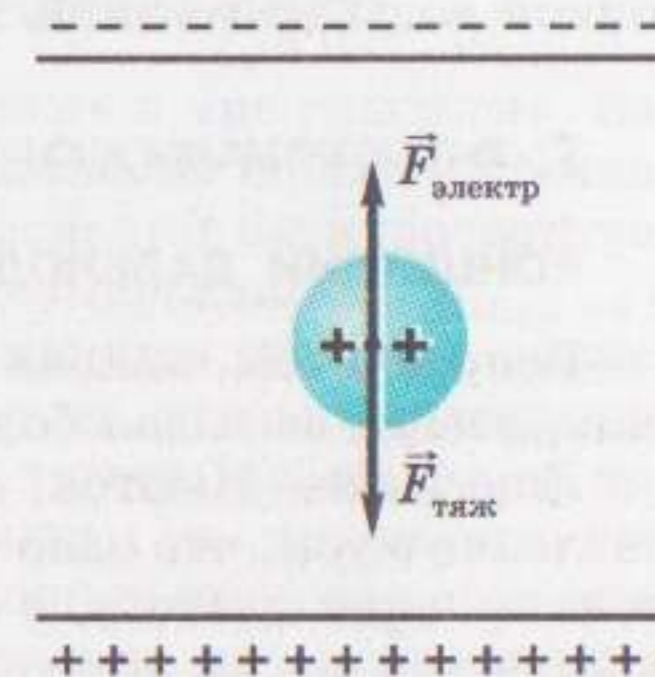


Рис. 37.2. Идея опыта Милликена

Зная действующую на капельку силу тяжести, можно определить электрическую силу, а вместе с нею — и заряд капельки.

Измерения и расчеты показали, что изменение заряда капельки всегда кратно величине $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Следовательно,

модуль заряда электрона, то есть элементарный электрический заряд e , равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Результаты опыта Милликена были затем подтверждены в опытах, поставленных российским физиком Абрамом Федоровичем Иоффе.

Велик ли заряд электрона?

Заряд одного электрона, равный по модулю $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, конечно, очень мал (можно даже сказать — меньше не бывает¹).

Однако в любом макроскопическом теле содержится настолько большое число атомов, что суммарный заряд находящихся в них электронов поистине огромен. Так, расчет показывает, что суммарный заряд электронов в одной столовой ложке воды равен по модулю примерно *миллиону кулонов* (это почти вдвое больше заряда земного шара!).

¹ Если не считать зарядов кварков (см. предыдущую сноску).

То, что этот колоссальный электрический заряд внешне никак не проявляет себя, объясняется тем, что он в точности компенсируется равным ему по модулю положительным зарядом протонов — частиц, входящих в состав атомных ядер. Точность этой компенсации удивительно высока: например, если бы положительный и отрицательный заряды в двух столовых ложках воды были бы не скомпенсированы всего-навсего на одну миллионную долю, эти «ложки воды» обладали бы зарядом в 1 Кл и, находясь на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействовали бы с той огромной силой, о которой мы уже упоминали.

Надеемся, что наше путешествие в глубь вещества помогло вам представить, какие огромные силы таятся под «гладью» спокойной воды всего лишь в столовой ложке.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

КОНЦЕПЦИИ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ И БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ

Вопрос о том, какова природа взаимодействия тел *на расстоянии*, всегда вызывал большой интерес ученых.

Еще Исаак Ньютон, открыв закон тяготения, писал: «Представление о том, что одно тело может действовать на другое на расстоянии через пустоту, я считаю нелепостью... Тяготение должно вызываться неким агентом, действующим по определенным законам». Судить о физической природе этого «агента» Ньютон отказался: в его время для этого не доставало опытных данных. Поэтому Ньютона (как мы видим, не совсем правильно) считают иногда сторонником концепции¹ *дальнодействия*, согласно которой тела могут взаимодействовать непосредственно через пустоту.

Согласно же концепции *близкодействия* взаимодействие тел осуществляется посредством *поля*: оно создается телами и, распространяясь в пространстве, достигает других тел и оказывает на них действие.

ОТКРЫТИЯ ФАРАДЕЯ, МАКСВЕЛЛА И ГЕРЦА

Представление о поле ввел в первой половине 19-го века английский ученый Майкл Фарадей. Он предположил, что *взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством электрического поля*: каждое заряженное тело создает поле, которое действует на другие заряженные тела.

Идеи Фарадея развил английский физик Джеймс Клерк Максвелл. Он считал, что электрическое и магнитное поля являются частными случаями *электромагнитного поля*, и построил теорию

¹ Концепцией называется система взглядов.

этого поля. Из нее следовало, что электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде волн. Вычисленная Максвеллом скорость распространения электромагнитных волн совпала со скоростью света, из чего Максвелл заключил, что свет — это электромагнитные волны.

В конце 19-го века существование электромагнитных волн подтвердил на опыте немецкий физик Генрих Герц.

Об электромагнитном поле мы расскажем более подробно в курсе физики 11-го класса, а в этой главе мы будем изучать *электростатическое поле*, то есть поле, создаваемое *покоящимися заряженными телами*.

МОЖНО ЛИ ПОЧУВСТВОВАТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ?

Электростатическое поле мы «не видим» и «не слышим», поскольку оно не воспринимается непосредственно нашими органами чувств. Поэтому в реальном существовании электростатического поля многие ученые долгое время сомневались.

Однако когда на помощь глазу и уху пришли приборы, сомнения исчезли. Приборы для того и изобретают, чтобы существенно расширить возможности наших органов чувств: наблюдая за показаниями приборов, мы видим или слышим то, что недоступно глазу или уху непосредственно. И с помощью приборов или специально поставленных опытов можно довольно легко обнаружить наличие электрического поля.

Ниже мы опишем некоторые из таких опытов (см. § 38. *Напряженность электрического поля*).

А сейчас рассмотрим: что же на самом деле воспринимают наши органы чувств?

Зрение

Начнем со *зрения*, поскольку около 90% всей информации об окружающем мире мы получаем благодаря зрению.

Как ни странно, *единственное*, что воспринимает глаз, — это *электрическое поле* электромагнитной волны, поскольку свет — это электромагнитные волны высокой частоты.

Осязание

Когда вы чувствуете какой-либо предмет на ощупь, между вашей рукой и этим предметом действуют силы упругости или силы трения. Обе эти силы, как вы уже знаете, имеют электрическую природу. Например, если вы попытаетесь «проткнуть пальцем стену», электрическое поле, созданное заряженными частицами стены, решительно остановит заряженные частицы вашего пальца.

Слух

Слуховые ощущения обусловлены переменным давлением звуковых волн на барабанную перепонку, то есть силами упругости, которые, как уже говорилось, имеют электрическую природу.

Вкус и обоняние

Восприятие вкуса и запаха имеет химическую природу, а мы уже знаем, что взаимодействие молекул также имеет электрическую природу.

Таким образом, «невидимое» и «неслышимое» электрическое поле является столь же реальным, как и все видимые, слышимые или ощущаемые любым другим образом предметы — более того, только благодаря электрическому полю мы их и ощущаем.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Закон Кулона:** неподвижные точечные заряды q_1 и q_2 действуют друг на друга в вакууме с силами, прямо пропорциональными модулям зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния r между зарядами. Модуль каждой силы: $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$. В системе СИ $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$.
- Все известные элементарные частицы либо не имеют электрического заряда (то есть нейтральны), либо имеют заряд, кратный по модулю заряду электрона. Модуль заряда электрона называют **элементарным электрическим зарядом**. Элементарный электрический заряд равен $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
- Взаимодействие между заряженными телами осуществляется посредством **электрического поля**: каждое из этих тел создает поле, которое действует на другое тело. Электрическое поле создается заряженными телами и действует на заряженные тела.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как называется единица электрического заряда в системе СИ?
2. Что такое точечный заряд?
3. Как формулируется закон Кулона?
4. Что такое элементарный электрический заряд?
5. Как и кем был измерен заряд электрона?

- 6*. Что общего у закона Кулона с законом всемирного тяготения и чем отличаются эти законы?
- 7*. Каковы основные свойства электрического поля? Кто ввел представление об этом поле?
- 8*. Существует ли гравитационное притяжение между одноименно заряженными телами? Если да, то почему его обычно не учитывают?
- 9*. Вычислите, во сколько раз сила электрического отталкивания двух электронов больше силы их гравитационного притяжения.



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Электрическое взаимодействие** заряженных тел обусловлено взаимодействием двух типов **электрических зарядов** — положительных и отрицательных. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.
- **Закон сохранения электрического заряда:** в электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается неизменной.
- **Носителями электрического заряда** являются заряженные частицы — **электроны** (в металлах) и **ионы** (например, в растворах солей).
- **Электрическими взаимодействиями** обусловлено строение атомов и молекул. В механических явлениях электрические взаимодействия проявляют себя как силы упругости и силы трения.
- **Закон Кулона:** неподвижные точечные заряды q_1 и q_2 действуют друг на друга в вакууме с силами, прямо пропорциональными модулям зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния r между зарядами: $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$. В системе СИ $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$.
- Все известные элементарные частицы либо не имеют электрического заряда (то есть нейтральны), либо имеют заряд, кратный по модулю заряду электрона. Модуль заряда электрона называется **элементарным электрическим зарядом**. Элементарный электрический заряд равен $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
- Взаимодействие между заряженными телами осуществляется посредством **электрического поля**: каждое из этих тел создает поле, которое действует на другое тело. Электрическое поле создается заряженными телами и действует на заряженные тела.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ»

1. В каких веществах носителями электрического заряда являются электроны? В каких — ионы?
2. Положительно заряженным телом коснулись незаряженного тела. В какую сторону при этом переместились электроны — с заряженного тела на незаряженное или с незаряженного на заряженное? Внешнее электрическое поле отсутствует.
3. Будет ли незаряженное тело притягиваться к положительно заряженному? к отрицательно заряженному?
4. Два небольших одинаковых шарика имели заряды q и $3q$. Шарики привели в соприкосновение и вернули в прежнее положение. Как изменилась сила взаимодействия между шариками?
5. Расстояние между двумя заряженными шариками увеличили в 5 раз. Как изменилась сила электрического взаимодействия между шариками?
6. Два заряда q и $-4q$ находятся на расстоянии 1 м друг от друга. В какой точке напряженность поля, создаваемого этими зарядами, равна нулю?
7. Обязательно ли траектория движения заряженной частицы в электрическом поле совпадает с линией напряженности поля?

Глава 8 СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



В этой главе мы рассмотрим свойства электрического поля. Мы изучим основные характеристики этого поля — напряженность и разность потенциалов, познакомимся с наглядным графическим представлением электрического поля с помощью линий напряженности. Вы узнаете, отчего бывают грозы.

Мы увидим также, какое перераспределение зарядов вызывает электрическое поле в проводниках и диэлектриках.

Мы познакомимся с понятием емкости и изучим основные свойства конденсаторов.

§ 38. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Напряженность электрического поля
2. Линии напряженности

Мы введем здесь основную характеристику электрического поля, с помощью которой можно охарактеризовать электрическое поле в каждой точке пространства. Это — напряженность поля.

Мы рассмотрим наглядное графическое изображение электрического поля с помощью линий напряженности и приведем некоторые примеры — для поля одного и двух точечных зарядов, заряженной сферы и заряженной плоскости.

1. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Охарактеризовать электрическое поле в данной точке пространства можно с помощью силы, действующей со стороны этого поля на помещенный в данную точку пробный заряд¹. Однако при этом мы должны учесть, что действующая на заряд сила зависит не только от поля в данной точке, но и от величины заряда.

Воспользуемся тем, что, как показывает опыт, сила \vec{F} , действующая на пробный заряд q , пропорциональна величине этого заряда. Следовательно, отношение силы к заряду не зависит от величины заряда и характеризует само электрическое поле. Поэтому

напряженностью \vec{E} электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы \vec{F} , действующей со стороны поля на точечный пробный заряд q , помещенный в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Из приведенного определения напряженности следует, что это векторная величина. Направление напряженности в каждой точке совпадает с направлением силы, действующей со стороны электрического поля на положительный заряд, помещенный в эту точку.

Единицей напряженности поля в системе СИ, как следует из формулы $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, является 1 Н/Кл.

¹ Пробный заряд должен быть достаточно малым, чтобы создаваемое им поле не изменяло исследуемое поле.

Если известна напряженность поля \vec{E} в данной точке, можно найти силу \vec{F} , действующую на заряд q , помещенный в эту точку, по формуле $\vec{F} = q\vec{E}$.

Поскольку напряженность поля определяют с помощью силы, действующей на заряд, ее называют силовой характеристикой поля.

В дальнейшем мы встретимся и с энергетической характеристикой поля (см. § 40. Потенциал и разность потенциалов).

НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА

Рассмотрим в качестве примера напряженность поля положительного точечного заряда Q .

Положительный пробный заряд, помещенный в любую точку, будет отталкиваться от этого заряда, поэтому напряженность поля в любой точке направлена от заряда Q (рис. 38.1).

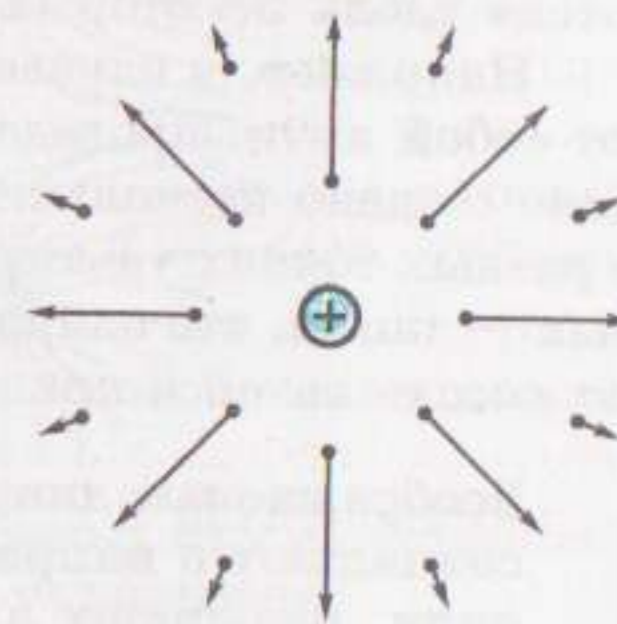


Рис. 38.1. Напряженность поля положительного точечного заряда в некоторых точках

Обратите внимание на то, что модуль напряженности при удалении от заряда уменьшается.

Чтобы найти модуль напряженности поля в любой точке, воспользуемся законом Кулона.

На пробный заряд q , находящийся на расстоянии r от заряда Q , действует сила $F = k \frac{Qq}{r^2}$. Поскольку модуль напряженности поля $E = \frac{F}{q}$, получаем $E = k \frac{Q}{r^2}$.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ

Как показывает опыт, если пробный заряд находится в поле, созданном несколькими зарядами, каждый из этих зарядов действует на пробный заряд независимо от других. Поэтому равнодействующая сил, действующих на пробный заряд со стороны этих зарядов, равна векторной сумме сил, действующих на пробный заряд со стороны каждого из зарядов.

А поскольку напряженность поля выражается через силу, действующую на пробный заряд, то

напряженность поля, созданного несколькими зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым из зарядов: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$.

Это положение называют *принципом суперпозиции* (наложения) полей.

Используя принцип суперпозиции, можно найти напряженность поля, создаваемого несколькими точечными зарядами, а также зарядами, распределенными на различных поверхностях.

2. ЛИНИИ НАПРЯЖЕННОСТИ

На примере поля точечного заряда (рис. 38.1) можно заметить, что векторы напряженности в разных точках как бы «выстраиваются» вдоль некоторых линий.

Например, в случае точечного заряда эти линии представляют собой лучи, проведенные из точки нахождения заряда. Если поле создано несколькими зарядами, то векторы напряженности в разных точках «выстраиваются» не вдоль прямых, а вдоль кривых — таких, что напряженность поля в каждой точке направлена *по касательной* к кривой, проходящей через эту точку.

Воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением напряженности электрического поля, называют линиями напряженности электрического поля¹.

Чтобы охарактеризовать не только направление, но и модуль напряженности поля в разных точках, линии напряженности проводят так, что *густота линий напряженности пропорциональна модулю напряженности*.

При этом линии напряженности являются *непрерывными*, то есть начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных².

Заметим также, что линии напряженности электрического поля *не пересекаются*. Действительно, если бы они пересекались, то в точке их пересечения направление напряженности поля не было бы определено.

¹ Иногда их называют также «силовыми линиями».

² Линии напряженности точечных зарядов, показанные на рис. 3.2, оканчиваются (или начинаются) на удаленных зарядах противоположного знака.

Примеры

Поля точечных зарядов

На рис. 38.2 изображены линии напряженности поля положительного и отрицательного точечных зарядов.

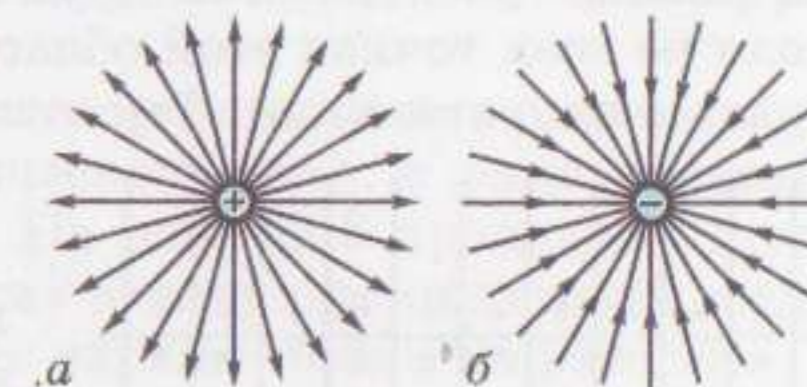


Рис. 38.2. Линии напряженности полей точечных зарядов: *a* — положительного, *б* — отрицательного

На рис. 38.3 изображены линии напряженности поля, созданного одинаковыми по модулю зарядами (разноименными и одноименными).

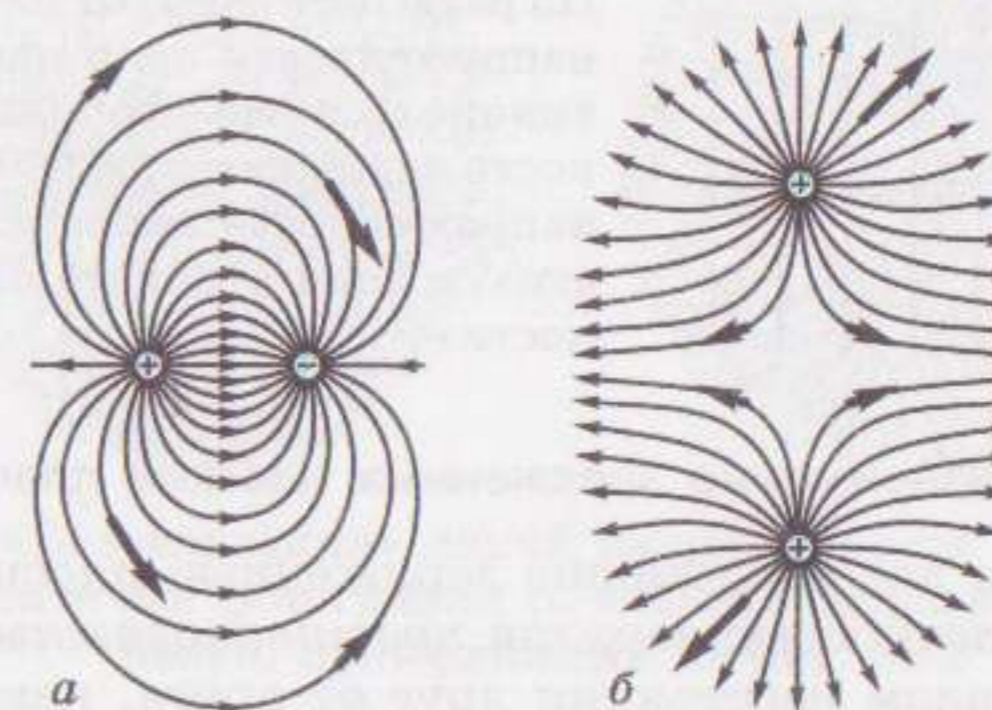


Рис. 38.3. Линии напряженности полей, созданных парами точечных зарядов: *a* — разноименных и *б* — одноименных

Для наглядности в некоторых точках изображены векторы напряженности поля.

Поле равномерно заряженной сферы

На рис. 38.4 изображены линии напряженности поля равномерно заряженной сферы.

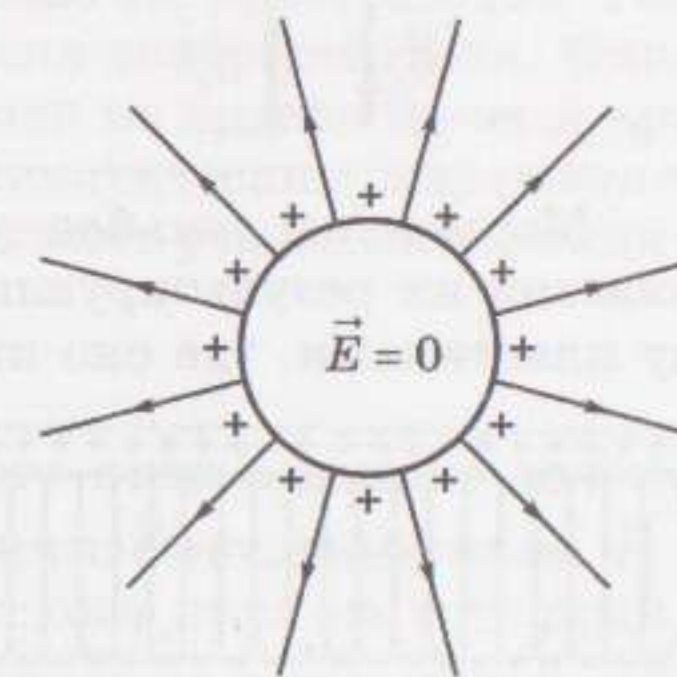


Рис. 38.4. Поле равномерно заряженной сферы

Вне сферы это поле совпадает с полем точечного заряда, расположенного в центре сферы. Внутри сферы напряженность поля равна нулю из-за того, что электрические поля, созданные в этой области зарядами, расположенными на различных частях сферы, в точности компенсируют друг друга.

Поле равномерно заряженной плоскости

На рис. 38.5 изображено электрическое поле вблизи однородно заряженной плоской поверхности. Линии напряженности этого поля представляют собой параллельные прямые, расположенные на равных расстояниях друг от друга, так как напряженность поля во всех точках этой области пространства *одинакова* (по модулю и направлению). Такое поле называется *однородным*.

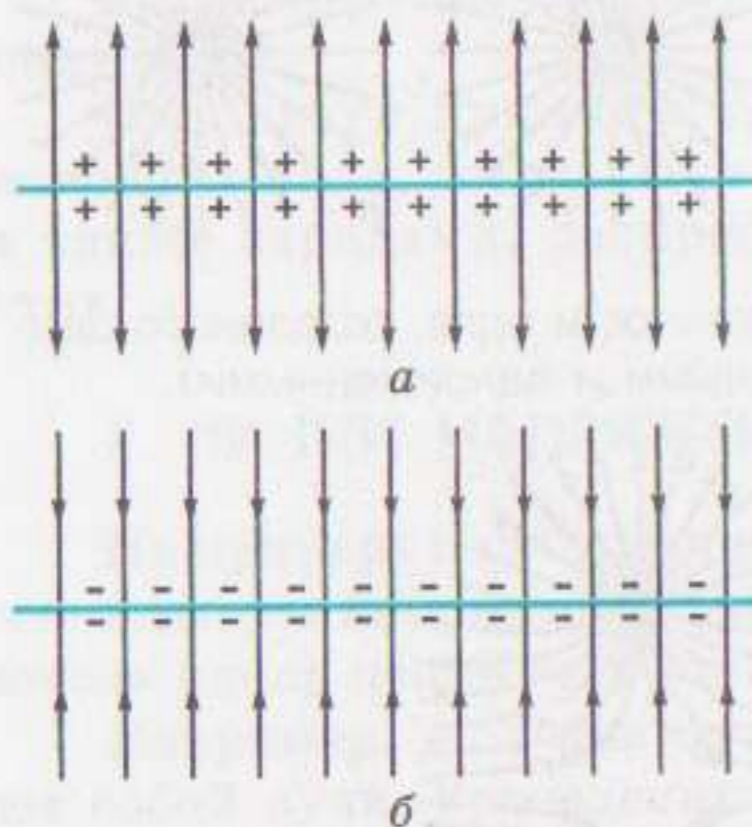


Рис. 38.5. Поле равномерно заряженной плоскости: *a* — положительно заряженной, *b* — отрицательно заряженной

По разные стороны от плоскости вектор напряженности поля направлен в противоположные стороны. Если плоскость заряжена положительно, вектор напряженности направлен «от плоскости», а если отрицательно — «к плоскости».

Поле двух разноименно заряженных плоских пластин

Расположим две равномерно заряженные плоские пластины с одинаковой плотностью зарядов *противоположных знаков* параллельно на малом расстоянии друг от друга, как показано на рис. 38.6.

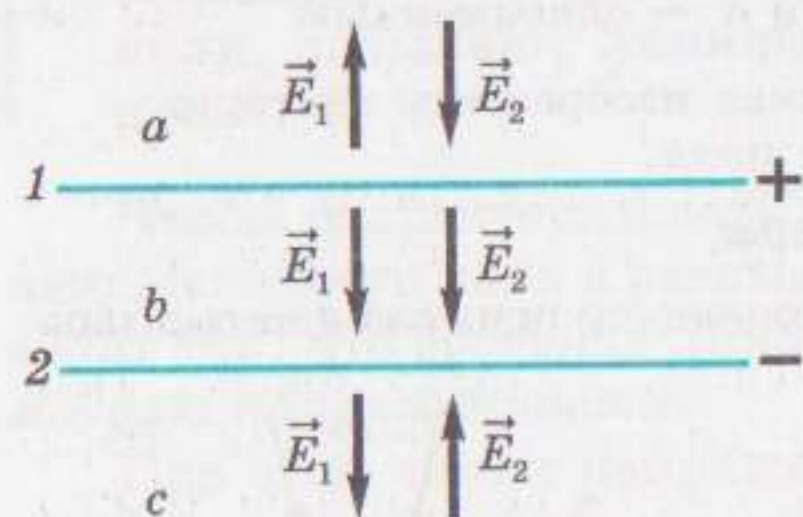


Рис. 38.6. Напряженности полей, создаваемых каждой из заряженных пластин 1 и 2 в различных областях пространства

Вне пластин (в областях *a* и *c*) векторы напряженности направлены противоположно, а между пластинами (в области *b*) — одинаково.

Мы увидим, что благодаря описанным выше свойствам полей пластин их результирующее поле сосредоточено в основном между пластинами, где оно практически однородно (рис. 38.7).



Рис. 38.7. Поле двух разноименно заряженных плоских пластин

МОЖНО ЛИ «УВИДЕТЬ» ЛИНИИ НАПРЯЖЕННОСТИ?

Линии напряженности электрического поля являются воображаемыми линиями, однако их форму можно сделать видимой, если поместить в электрическое поле мелкие тела продолговатой формы — кристаллики, частицы манной крупы, мелко настриженный волос и т. п.

Такие тела поворачиваются в электрическом поле, ориентируясь вдоль напряженности электрического поля, и «выстраиваются» вдоль линий напряженности. На рис. 38.8 приведены полученные таким образом «фотографии» электрических полей, создаваемых одноименно и разноименно заряженными шариками.

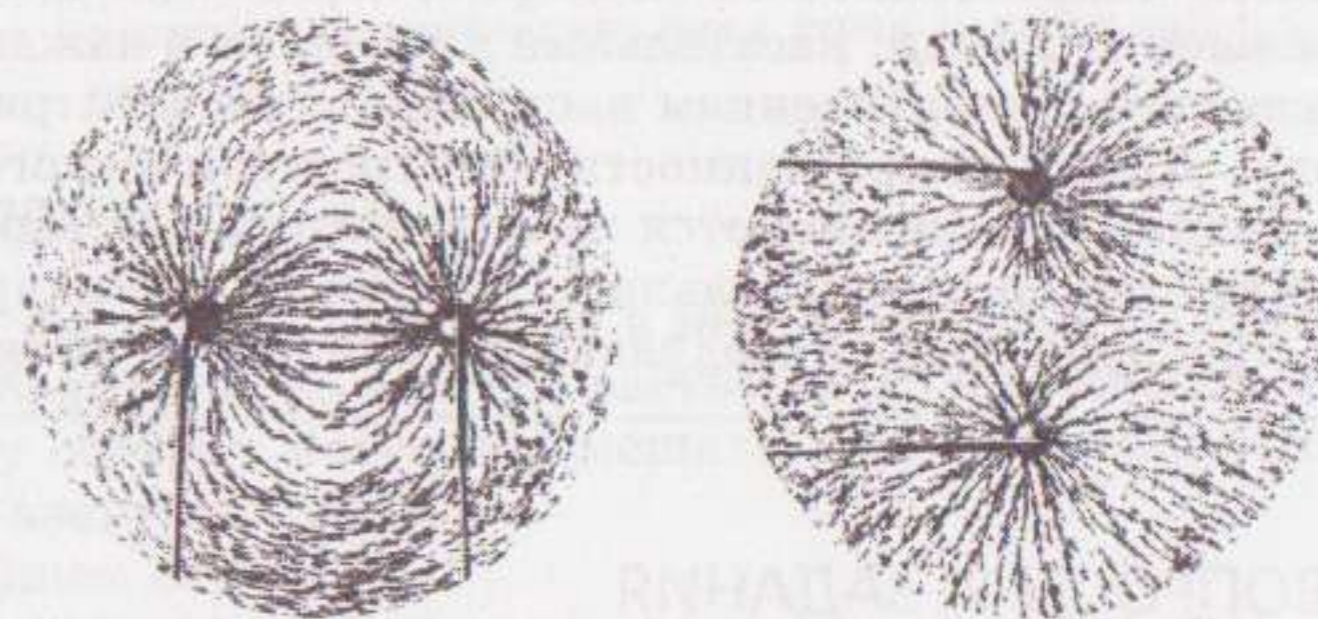


Рис. 38.8. «Визуализация» линий напряженности электрических полей. Сравните эти фотографии со схематическими изображениями полей, приведенными на рис. 38.3

Опыты, подобные описанному, поставил еще Майкл Фарадей. И линии напряженности (которые Фарадей называл силовыми линиями) настолько наглядно «проявлялись» в таких опытах, что это навело Фарадея на мысль о реальности электрического поля.

Его соотечественник и последователь, английский физик Дж. Максвелл, построивший впоследствии математическую теорию электромагнитного поля, писал: «Фарадей своим мысленным взором видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели только центры сил дальнего действия, Фарадей увидел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, интересуясь только математическим выражением закона действия сил, Фарадей искал сущность реальных явлений».

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Напряженностью \vec{E} электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы \vec{F} , действующей со стороны электрического поля на точечный

пробный заряд q , помещенный в данную точку поля, к значению этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Напряженность поля является *векторной величиной* и представляет собой *силовую характеристику* электрического поля.

- **Принцип суперпозиции электрических полей:** напряженность поля \vec{E} , созданного в данной точке несколькими зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым из зарядов: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$.
- **Линиями напряженности** электрического поля называют воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением напряженности электрического поля. Линии напряженности электростатического поля непрерывны. Они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Густота линий напряженности пропорциональна модулю напряженности поля.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое напряженность электрического поля? Какая это величина — векторная или скалярная?
2. Как направлена напряженность поля положительного и отрицательного точечных зарядов (по отношению к заряду)?
3. Опишите основные свойства линий напряженности.
4. Могут ли линии напряженности пересекаться? Обоснуйте ваш ответ.
5. Изобразите схематически вид линий напряженности для: а) поля точечного заряда (положительного и отрицательного); б) поля равномерно заряженной сферы; в) поля равномерно заряженной плоскости; г) поля двух разноименно заряженных пластин с равными по модулю зарядами.
6. Опишите опыт, с помощью которого можно наблюдать форму линий напряженности.
- 7*. Точка находится на середине отрезка, соединяющего два одинаковых по модулю электрических заряда. Может ли напряженность поля, создаваемого в этой точке обоими зарядами, быть равной нулю? Обоснуйте свой ответ.
- 8*. Два положительных заряда q и $4q$ находятся на расстоянии 3 м друг от друга. В какой точке напряженность поля, создаваемого этими зарядами, равна нулю? (Данные в этой задаче подобраны так, чтобы ее можно было решить устно.)

§ 39. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1. Проводники
2. Диэлектрики

В этом параграфе мы рассмотрим, как влияет электрическое поле на заряды в проводниках и диэлектриках.

Благодаря наличию в проводниках свободных зарядов напряженность электростатического поля внутри проводника становится равной нулю. В диэлектриках же напряженность электрического поля хотя и уменьшается, но не обращается в нуль.

1. ПРОВОДНИКИ

Как вы знаете, электроны в металлах могут перемещаться по всему образцу. А во многих растворах солей, кислот и щелочей по всему образцу могут перемещаться ионы (такие растворы называют электролитами).

В общем случае

заряженные частицы, которые могут перемещаться по всему образцу, называют свободными зарядами (в случае металлов — свободными электронами), а вещества, содержащие свободные заряды, называют проводниками.

Поскольку живые ткани содержат растворы солей, они обычно являются проводниками (в частности, проводником является тело человека).

Если поместить проводник в электрическое поле, то находящиеся в нем свободные заряды придут в движение и в проводнике возникнет *направленное движение зарядов*, то есть *электрический ток*.

Проводники потому так и называются, что они *проводят* электрический ток.

ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассмотрим, как поведут себя свободные заряды в проводнике, если образец проводника поместить в электрическое поле. Возьмем для определенности металлический образец.

Под действием поля свободные электроны начнут двигаться, то есть в образце возникнет электрический ток. Однако если образец *изолирован*, очень скоро (почти мгновенно) электроны в некотором избытке скопятся на одном конце образца, а на противо-

положном конце образца возникнет недостаток электронов. Таким образом, под действием внешнего поля в металлическом образце произойдет *перераспределение заряда*: одна часть образца зарядится отрицательно (там, где образовался избыток электронов), а другая — положительно (там, где образовался недостаток электронов).

Как же изменится поле внутри образца вследствие описанного перераспределения заряда? Свободные электроны будут двигаться до тех пор, пока на них действует электрическое поле. И прекратится это движение только тогда, когда напряженность поля в проводнике обратится в нуль.

Таким образом,

при равновесии зарядов напряженность поля внутри изолированного проводника равна нулю.

В результате перераспределения зарядов изменяется и электрическое поле вне проводника (рис. 39.1 и 39.2).

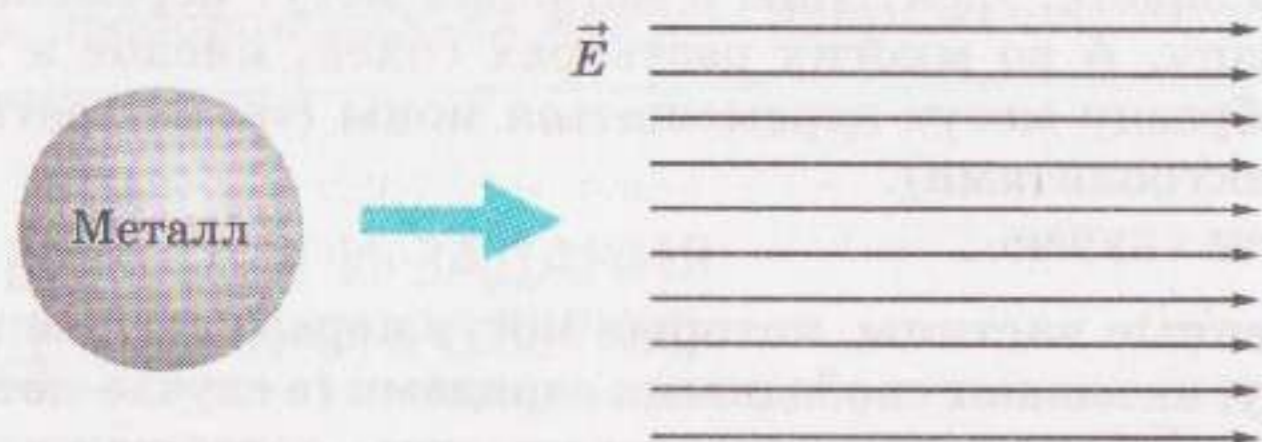


Рис. 39.1. Металлический незаряженный шар вносят в однородное электрическое поле

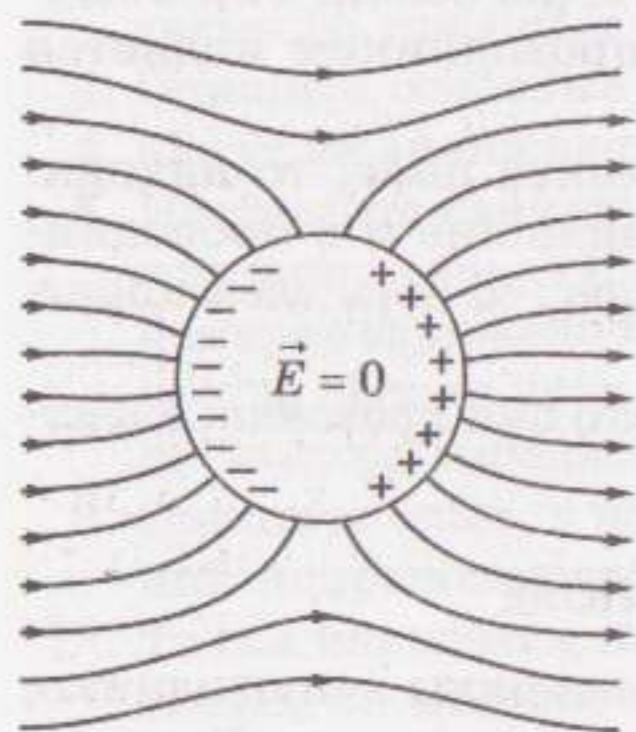


Рис. 39.2. Линии напряженности электрического поля после внесения в него металлического шара

Внутри шара напряженность поля равна нулю. Обратите внимание на то, что вследствие появления зарядов на поверхности шара поле вне шара также изменилось.

Расчеты и опыты показывают, что

электрический заряд расположен всегда на поверхности проводника — как в случае заряженного, так и в случае незаряженного проводника.

Электростатическая защита

Напряженность электрического поля равна нулю не только в сплошном изолированном проводнике, но и внутри *полого* проводника (вспомним, например, что напряженность поля внутри однородно заряженной сферы равна нулю).

Это используют для создания *электростатической защиты*: например, чувствительные к электрическому полю приборы заключают в металлические ящики.

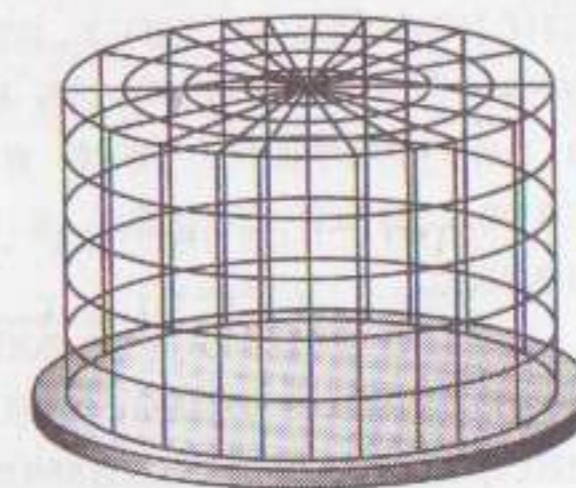


Рис. 39.3. Для создания достаточно эффективной электростатической защиты можно использовать даже проволочную сетку (ее называют иногда «сеткой Фарадея»)

Электростатическую защиту используют также, чтобы защитить людей, работающих в сильном электрическом поле: в таком случае металлической сеткой окружают пространство, в котором работают люди.

2. ДИЭЛЕКТРИКИ

Во многих веществах — газах, находящихся при не слишком высокой температуре, различных жидкостях (в том числе дистиллированной воде), стекле, пластмассах, резине и т. д. — свободных зарядов нет. Такие вещества называют *диэлектриками* (или *изоляторами*, поскольку они не проводят электрический ток и поэтому *изолируют* проводники друг от друга).

Однако отсутствие свободных зарядов вовсе не означает отсутствия заряженных частиц: ведь в атомах и молекулах диэлектриков, как и любых других веществ, есть положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. И хотя в диэлектриках все электроны прочно связаны со своими атомами (или молекулами) и не могут покидать их подобно тому, как это делают электроны в металлах, все-таки и диэлектрики «чувствуют» электрическое поле: под его действием молекулы диэлектриков поворачиваются или деформируются.

Поэтому при внесении образца из диэлектрика в электрическое поле в этом образце также происходит перераспределение заряда: на его поверхности появляются так называемые «связанные» заряды. Рассмотрим это подробнее.

ДВА ВИДА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Полярные диэлектрики

В молекулах некоторых веществ центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают.

Такие диэлектрики называют *полярными*, потому что у молекул этих диэлектриков есть как бы два полюса зарядов — положительный и отрицательный (рис. 39.4).

Например, в молекуле воды H_2O , состоящей из одного атома кислорода и двух атомов водорода, электроны атомов водорода большую часть времени проводят вблизи атома кислорода, в результате чего возле атома кислорода образуется отрицательный полюс, а возле атомов водорода — положительный полюс.

Под действием электрического поля молекулы полярных диэлектриков поворачиваются, как схематически изображено на рис. 39.5, и принимают положение, показанное на рис. 39.6.



Рис. 39.4. Схематическое изображение полярной молекулы

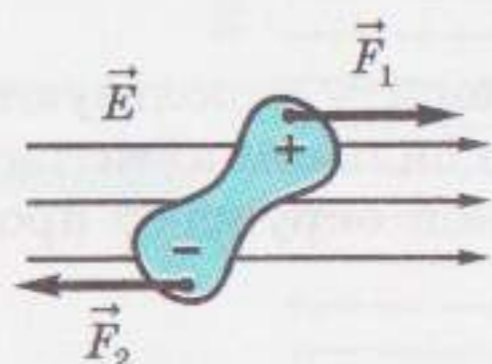


Рис. 39.5. Поворот молекулы полярного диэлектрика в электрическом поле

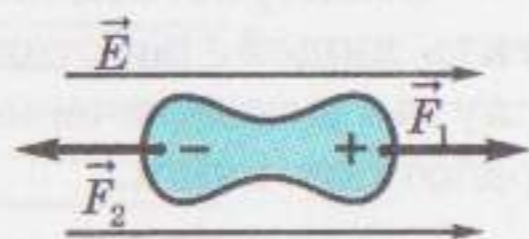


Рис. 39.6. Устойчивое положение молекулы полярного диэлектрика в электрическом поле

Неполярные диэлектрики

Диэлектрики, в молекулах которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают, называют *неполярными*. К ним относятся, например, инертные газы, кислород, бензол.

Под действием внешнего электрического поля положительные и отрицательные заряды в молекуле смещаются в противоположные стороны.

В результате деформации молекулы неполярного диэлектрика центры распределения положительных и отрицательных зарядов перестают совпадать. Деформированная молекула с точки зрения распределения зарядов становится подобной полярной молекуле, ориентированной вдоль линии напряженности поля (см. рис. 39.6).

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Итак, мы видим, что под действием электрического поля молекулы как полярных, так и неполярных диэлектриков «выстраиваются» по направлению напряженности внешнего электрического поля¹.

Это явление называют *поляризацией диэлектрика*.

В результате поляризации диэлектрика на его поверхности появляются заряды (рис. 39.7).

Их называют *связанными зарядами*, поскольку они обусловлены перераспределением заряда только внутри молекул (а не во всем образце, как это происходит при движении свободных зарядов в проводнике).

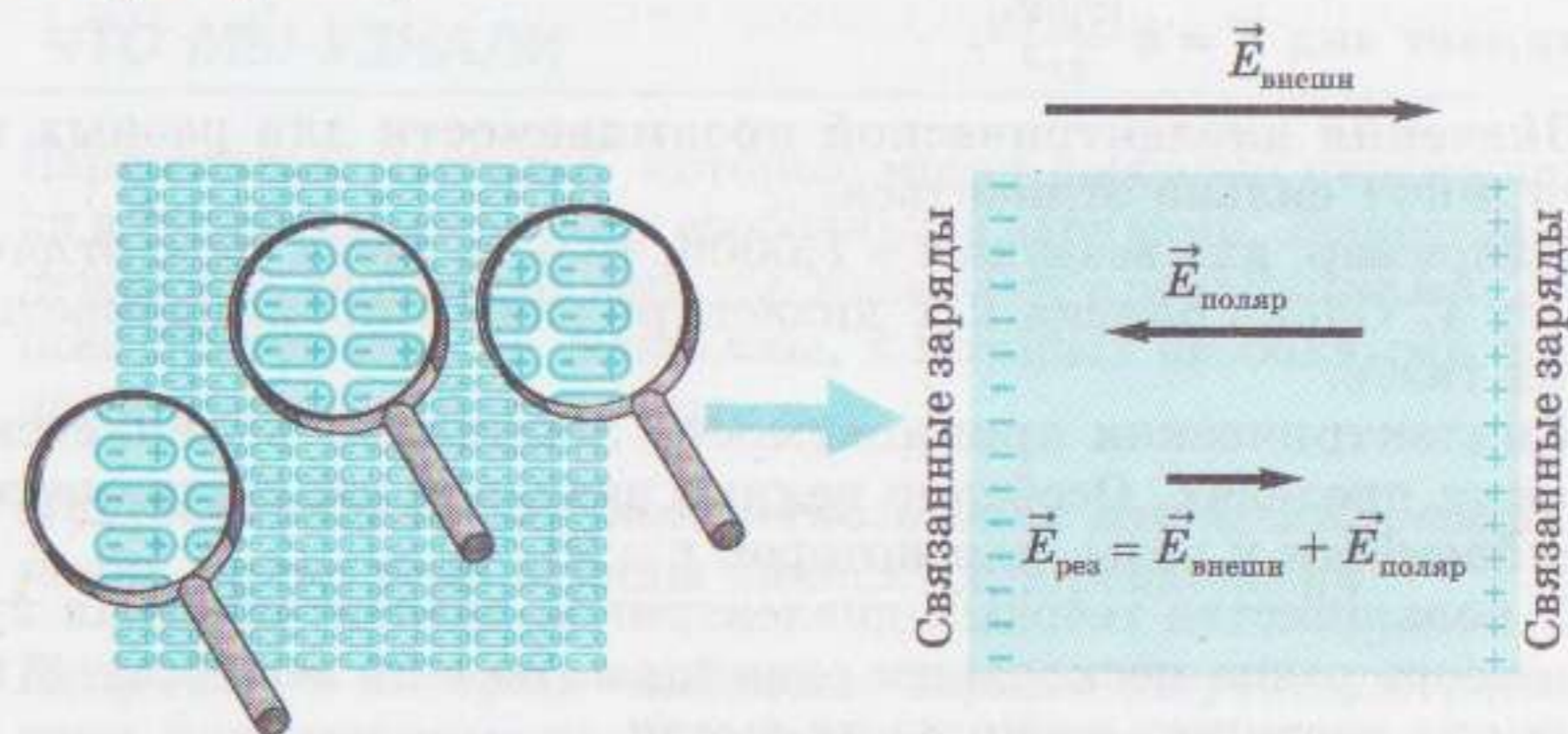


Рис. 39.7. Схематическое изображение поляризации диэлектрика

Рассмотрим теперь, как изменяется напряженность электрического поля при внесении в него диэлектрика вследствие появления связанных зарядов на поверхности диэлектрика.

Заметим, что напряженность поля $\vec{E}_{\text{полар}}$, созданного связанными зарядами, направлена *противоположно* напряженности $\vec{E}_{\text{внешн}}$ внешнего электрического поля (рис. 39.7).

Значит, согласно принципу суперпозиции (см. § 38. *Напряженность электрического поля*) поле, созданное связанными зарядами на поверхности диэлектрика, *уменьшает* напряженность поля внутри диэлектрика (однако не до нуля, как в случае проводника).

Таким образом, мы приходим к выводу, что

вследствие поляризации диэлектрика напряженность электрического поля внутри диэлектрика уменьшается.

¹ На самом деле происходит лишь частичная ориентация молекул полярных диэлектриков.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Величину, показывающую, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля внутри данного однородного диэлектрика, называют его диэлектрической проницаемостью и обозначают ϵ .

Поскольку взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством электрического поля, а поле в диэлектрике уменьшается в ϵ раз, то во столько же раз уменьшается и сила взаимодействия заряженных тел, погруженных в однородный диэлектрик.

Например, для точечных зарядов, находящихся в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ , закон Кулона принимает вид $F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$.

Значения диэлектрической проницаемости для разных веществ могут сильно отличаться.

Например, для воздуха $\epsilon = 1,0006$, то есть очень мало отличается от 1. Очень близка к 1 диэлектрическая проницаемость и других газов.

Диэлектрическая проницаемость жидкостей изменяется в широких пределах. Особенно велико значение диэлектрической проницаемости у воды, для которой $\epsilon = 81$.

У большинства твердых диэлектриков диэлектрическая проницаемость равна нескольким единицам, но есть вещества, у которых она достигает нескольких тысяч.

ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ДЕЙСТВУЕТ НА НЕЗАРЯЖЕННЫЕ ПРЕДМЕТЫ?

Мы начали эту главу с рассказа о свойстве натертого янтаря притягивать мелкие предметы. Выясним теперь: почему наэлектризованный янтарь притягивает незаряженные легкие предметы?

Дело в том, что электрическое поле вокруг заряженных тел неоднородно: чем ближе к заряженному телу, тем больше напряженность поля.

Когда незаряженный предмет вносят в электрическое поле, на поверхности предмета появляются связанные заряды противоположных знаков. В результате на разные части предмета со стороны поля будут действовать противоположно направленные силы (рис. 39.8). И в неоднородном поле «побеждает» та сила, которая действует на заряды, находящиеся в более сильном поле, то есть ближе к заряженному телу. Поэтому незаряженное тело притягивается к заряженному.

Теперь становится понятно, почему отталкивание заряженных тел заметили только через две тысячи лет после того, как обнаружили притяжение, обусловленное электрическим взаимодействием.

Ведь тела притягиваются, если заряжено только одно из них, причем зарядом любого знака, а отталкиваются лишь тогда, когда заряжены оба тела, причем обязательно одноименно.

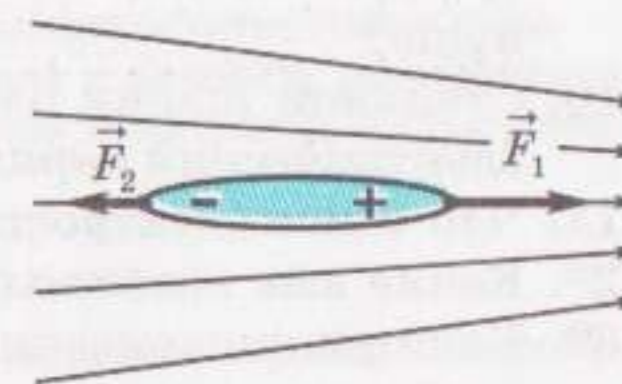


Рис. 39.8. Втягивание диэлектрика в область более сильного поля

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- Заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться в веществе, называют свободными зарядами. Вещества, содержащие свободные заряды, называют проводниками. Лучшие проводники — металлы, в которых свободными зарядами являются электроны.
- Напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю, если заряды находятся в равновесии.
- Вещества, в которых свободные заряды отсутствуют, называют диэлектриками. Вследствие поляризации диэлектрика напряженность электростатического поля внутри диэлектрика уменьшается. Величину, показывающую, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля внутри однородного диэлектрика, называют диэлектрической проницаемостью и обозначают ϵ .



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как называют вещества, которые проводят электрический ток?
2. Как называют вещества, которые не проводят электрический ток?
3. Что называют «свободными зарядами»? В каких веществах они есть?
4. Что представляют собой свободные заряды в металлах?
5. Чему равна напряженность электрического поля внутри изолированного проводника при равновесии свободных зарядов?
6. Что такое связанные заряды?
7. Что такое поляризация диэлектрика?

8. Увеличивается или уменьшается электрическое поле внутри диэлектрика вследствие его поляризации?
9. Почему при равновесии свободных зарядов напряженность электрического поля внутри изолированного проводника равна нулю?
10. Стальной шарик электрически заряжен. Где расположен его электрический заряд?
11. Что такое электростатическая защита? Когда ее используют?
- 12*. Какие вам известны виды диэлектриков? Чем они отличаются?
- 13*. Как при поляризации диэлектрика происходит разделение зарядов?
- 14*. Как направлена напряженность электрического поля, созданного связанными зарядами диэлектрика?
- 15*. Что такое диэлектрическая проницаемость?
- 16*. Как записывается закон Кулона для точечных зарядов, находящихся в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ ?
- 17*. Почему электрическое поле действует на незаряженные предметы?
- 18*. Будет ли взаимодействовать заряженный шарик с таким же, но незаряженным шариком? Каким будет характер этого взаимодействия? Обоснуйте свой ответ.
- 19*. Легкое подвешенное на нити продолговатое тело из диэлектрика вносят в однородное электрическое поле. Изобразите схематически в тетради, какое положение займет тело и как перераспределятся заряды в теле.

§ 40. ПОТЕНЦИАЛ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

1. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле
2. Потенциал электростатического поля и разность потенциалов
3. Связь между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля
4. Отчего бывают грозы?

Мы рассмотрим потенциальную энергию заряда в электростатическом поле и введем энергетическую характеристику поля.

Мы рассмотрим также вопрос об атмосферном электричестве.

1. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

На заряд¹, находящийся в электростатическом поле, действует сила со стороны этого поля. При перемещении заряда эта сила может совершать *работу*, которую часто называют работой поля.

Итак, система «заряд + поле» *обладает способностью совершать работу.*

Вы уже знаете, что система, способная совершать работу, может обладать *потенциальной энергией.*

Изменение потенциальной энергии ΔW_p связано с совершенной системой работой A соотношением $\Delta W_p = -A$ (знак «минус» означает, что если система совершает положительную работу, то ее потенциальная энергия уменьшается).

Расчеты и опыт показывают, что работа поля при перемещении заряда из одной точки в другую в *электростатическом* поле зависит только от положения этих точек и не зависит от траектории движения заряда².

Например, работа при перемещении заряда из точки 1 в точку 2 не зависит от того, по какой траектории перемещают заряд (рис. 40.1). В таком случае можно ввести понятие *потенциальной энергии заряда* в электрическом поле.

¹ Напомним, что зарядом мы для краткости называем заряженное тело, когда интересующим нас свойством является электрическое взаимодействие этого тела с другими заряженными телами.

² Как вы уже знаете, таким же свойством обладает работа силы тяжести: она тоже зависит только от начального и конечного положения тела и не зависит от траектории его движения.

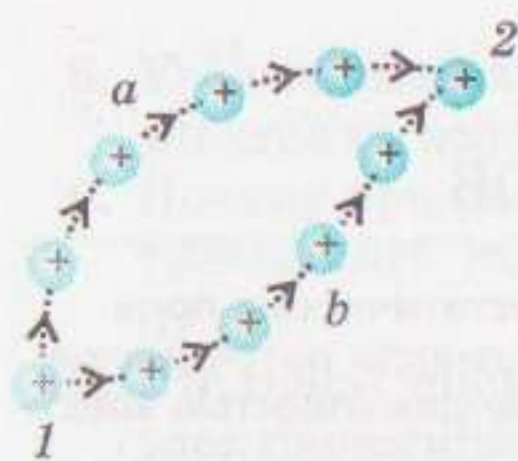


Рис. 40.1. Две различные траектории (*a* и *b*) перемещения заряда из точки 1 в точку 2

При перемещении по любой из траекторий работа одинакова.

Если бы работа поля по перемещению заряда зависела от траектории движения заряда, невозможно было бы однозначно определить изменение потенциальной энергии заряда при перемещении его из одной точки в другую. Следовательно, в таком случае нельзя было бы ввести понятие потенциальной энергии заряда в поле.

2. ПОТЕНЦИАЛ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Во многих случаях, например при изучении действия электрического тока, основной интерес представляет не сила, действующая на заряд в электрическом поле, а *работа*, совершаемая полем при перемещении заряда. Так, именно ею определяется яркость электрических ламп и мощность электродвигателей.

Работа поля связана с его *энергетической* характеристикой, которую мы сейчас рассмотрим.

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Чтобы определить энергетическую характеристику поля, воспользуемся тем, что работа поля по перемещению заряда пропорциональна значению этого заряда (так как сила, действующая на заряд со стороны поля, пропорциональна значению заряда).

Отсюда следует, что *отношение* силы к значению пробного заряда не зависит от значения заряда и характеризует *само поле*.

Заметим теперь, что так как сила, действующая со стороны поля на заряд, пропорциональна значению этого заряда, то и работа, совершаемая полем при перемещении заряда, также пропорциональна значению заряда. Отсюда следует, что и потенциальная энергия заряда в поле пропорциональна значению заряда.

Следовательно, *отношение* потенциальной энергии заряда к значению заряда не зависит от заряда и поэтому характеризует *само поле*.

Потенциалом электростатического поля ϕ в данной точке называют физическую величину, равную отношению потенциальной энергии W_p заряда q , помещенного в данную точку

поля, к значению этого заряда: $\phi = \frac{W_p}{q}$.

Из этого определения следует, что потенциал поля является *скалярной* величиной (в отличие от напряженности поля, которая является векторной величиной).

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Как вы знаете из курса механики, физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а ее *изменение*: именно оно связано с совершенной системой работой соотношением $\Delta W_p = -A$.

Поэтому физический смысл имеет не потенциал в точке, а *разность потенциалов* между *двумя* точками: именно она связана с работой поля при перемещении заряда из одной точки в другую.

Разность потенциалов между точками 1 и 2 равна отношению работы поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2

к значению этого заряда: $\phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q}$.

Разность потенциалов называют также *напряжением*¹ и обозначают U .

Единица разности потенциалов

В системе СИ единицей разности потенциалов является *вольт* (В). Эта единица названа в честь итальянского ученого Алессандро Вольта, создавшего первый химический источник электрического тока.

Из определения разности потенциалов следует, что $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Если разность потенциалов между двумя точками равна 1 В, то при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу 1 Дж.

Электрон-вольт

В атомной физике в качестве единицы энергии часто используют *электрон-вольт* (эВ). Один электрон-вольт равен модулю изменения энергии электрона ΔE при прохождении им разности потенциалов $\Delta \phi = 1 \text{ В}$.

Поскольку модуль заряда электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, то $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Велика ли разность потенциалов 1 В?

Разность потенциалов между двумя разомкнутыми полюсами химического источника тока составляет обычно от 1,5 В до 9 В. Напряжение в электрооборудовании автомобиля и в школьных

¹ Не путайте *напряжение* с *напряженностью*: напряжение (скаляр) является энергетической характеристикой поля, а напряженность (вектор) — силовой характеристикой.

приборах для лабораторных работ не превышает 12 В. Такое напряжение не представляет опасности для человека.

В квартиры, однако, подводится намного более высокое напряжение, равное 220 В. Это напряжение *опасно для жизни*, поэтому прежде чем отремонтировать неисправный электроприбор (утюг, выключатель, розетку и т. д.), необходимо *обесточить* его (рис. 40.2).



Рис. 40.2. Перед ремонтом электроприборов не забудьте их обесточить!

Выключатель или розетку можно обесточить выключателем, расположенным на щитке электросчетчика (если такого выключателя нет, выверните пробки).

В курсе физики 11-го класса мы объясним, почему напряжение в осветительной сети не удается понизить до безопасного уровня.

3. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАЗНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ И НАПРЯЖЕННОСТЬЮ

Зная действующую на заряд силу, можно найти и работу, совершаемую при перемещении заряда, поэтому силовая и энергетическая характеристики поля, то есть напряженность и разность потенциалов, связаны друг с другом.

Найдем соотношение между разностью потенциалов и напряженностью в однородном поле. Пусть положительный пробный заряд q перемещается в однородном электростатическом поле с напряженностью \vec{E} в направлении линий напряженности на расстояние d (рис. 40.3).

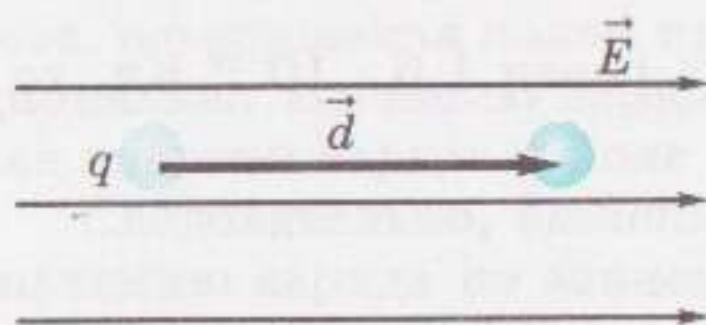


Рис. 40.3. К нахождению работы поля при перемещении заряда

На заряд со стороны поля действует сила $q\vec{E}$, направленная вдоль перемещения, поэтому при перемещении на расстояние d поле совершает работу $A = qEd$. Разность потенциалов связана с работой соотношением $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = Ed$. Следовательно,

в однородном электростатическом поле с напряженностью \vec{E} разность потенциалов между точками, соединенными вектором \vec{d} , направление которого совпадает с направлением напряженности поля, определяется формулой $U = Ed$.

Соотношение между напряженностью и разностью потенциалов можно записать также в виде $E = \frac{U}{d}$.

Заметим, что

напряженность поля направлена в сторону убывания потенциала.

Действительно, если направление перемещения положительного заряда совпадает с направлением напряженности поля, поле совершает положительную работу и, следовательно, потенциальная энергия заряда *уменьшается*.

Единица напряженности поля

Единицу напряженности поля можно определить также, исходя из формулы $E = \frac{U}{d}$. Эту единицу напряженности называют *вольт на метр* (В/м). Она совпадает с единицей Н/Кл, введенной в § 38. *Напряженность электрического поля*, так как $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$, а $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Если работа поля при перемещении заряда равна нулю, то равна нулю и разность потенциалов между начальной и конечной точками.

Как вы уже знаете из курса механики, работа силы равна нулю, если направление перемещения перпендикулярно направлению силы. Следовательно, при перемещении заряда в электрическом поле работа поля равна нулю, если направление перемещения перпендикулярно направлению напряженности поля.

Отсюда следует, что когда заряд перемещается в однородном поле перпендикулярно линиям напряженности, разность потенциалов между любыми точками траектории равна нулю (рис. 40.4).

При перемещении пробного заряда в поле точечного заряда вдоль дуги окружности с центром в точке нахождения точечного заряда направление перемещения пробного заряда перпендикулярно направлению напряженности поля (рис. 40.5). Поэтому разность потенциалов между любыми точками, находящимися на одинаковом расстоянии от точечного заряда, равна нулю.

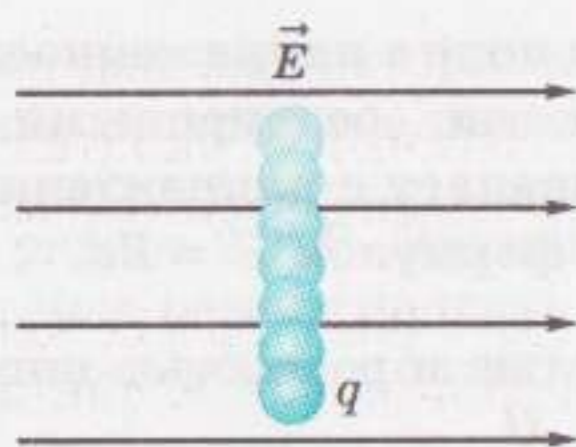


Рис. 40.4. При таком перемещении заряда в однородном поле работа поля равна нулю

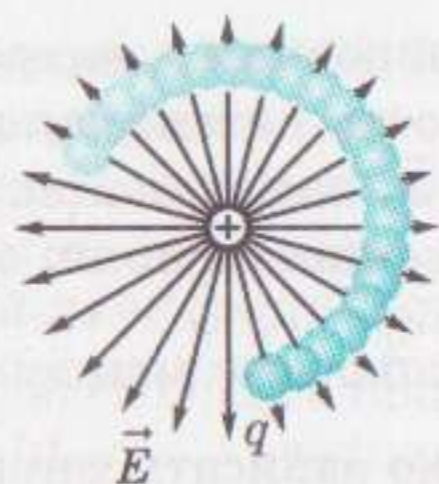


Рис. 40.5. При таком перемещении пробного заряда в поле точечного заряда работа поля равна нулю

Поверхность, все точки которой имеют равный потенциал, называют эквипотенциальной¹ поверхностью.

Примеры

На рис. 40.6 и 40.7 пунктиром обозначены эквипотенциальные поверхности в однородном поле и в поле точечного заряда.

Однородное поле

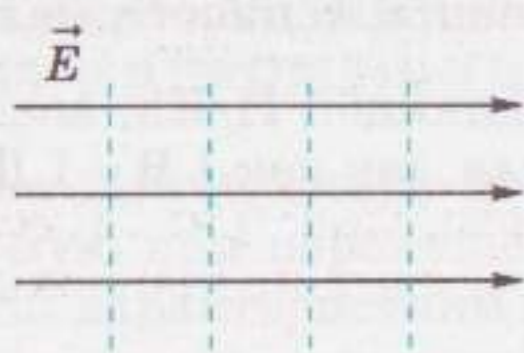


Рис. 40.6. Эквипотенциальные поверхности однородного поля

Поле точечного заряда

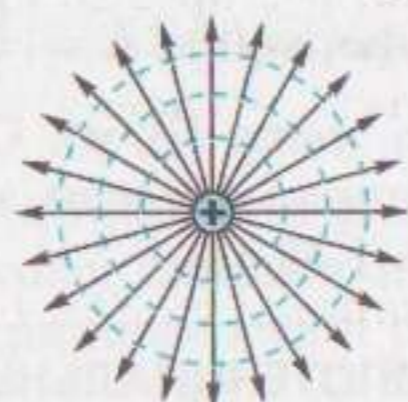


Рис. 40.7. Эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда

Может ли быть эквипотенциальным объемное тело?

Если напряженность поля во всем объеме тела равна нулю, то при перемещении пробного заряда из одной точки тела в любую другую точку этого же тела поле не совершает работы. Следовательно, в таком случае все точки тела имеют равный потенциал.

Например, равный потенциал имеют все точки изолированного проводника, когда заряды в нем находятся в равновесии, так как при этом напряженность поля во всем объеме проводника равна нулю (см. § 39. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле). Отсюда следует, в частности, что поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью.

¹ От латинского «эквус» — равный.

4. ОТЧЕГО БЫВАЮТ ГРОЗЫ?

Наша Земля представляет собой огромный отрицательно заряженный шар: электрический заряд Земли равен (по модулю) примерно 600 000 кулонов.

А на высоте 50—100 км от поверхности Земли расположен положительно заряженный сферический слой ионов — так называемая ионосфера (рис. 40.8).

Поэтому вблизи поверхности Земли существует электростатическое поле.

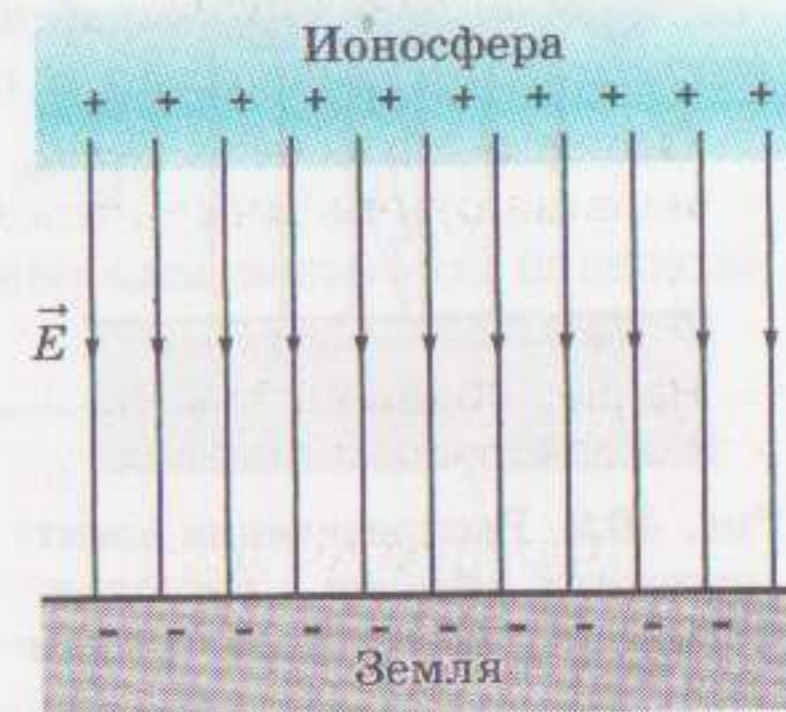


Рис. 40.8. Электрическое поле вблизи поверхности Земли в ясную погоду

В этом поле разность потенциалов между точками, расположенными на уровне головы и ног стоящего человека, составляет около 200 вольт. Мы не чувствуем этой разности потенциалов, потому что тело человека — проводник, а в проводнике происходит быстрое перераспределение зарядов, компенсирующее внешнее поле.

В ясную погоду Земля постепенно разряжается: от ионосферы к поверхности Земли течет ток. Но разрядки не происходит из-за... гроз!

Оказывается, грозы не разряжают, а заряжают Землю!

Падая с большой высоты, капли воды или кристаллики льда электризуются при столкновениях с ионами, а также другими микроскопическими частицами. В результате капли воды приобретают отрицательный заряд и переносят его при падении в нижнюю часть тучи, которая, таким образом, становится грозовой тучей.

Скопившийся в нижней части грозовой тучи большой отрицательный заряд притягивает к находящейся под ним поверхности Земли большой положительный заряд, и в результате между этими зарядами возникает огромная разность потенциалов — в десятки и сотни миллионов вольт.

Электрическое поле становится настолько большим, что возникает электрический разряд через воздух в виде огромной искры длиной иногда в несколько километров. Это и есть молния (рис. 40.9 и 40.10).

Молнии переносят отрицательный заряд на Землю, снова и снова заряжая ее. Так и работает эта гигантская электрическая батарея вот уже миллиарды лет.

Возникает вопрос: что же питает ее все это время энергией?

В конечном счете, электромагнитное поле! Ведь водяные капли в туче появляются при конденсации водяного пара, а он образуется при испарении морей и океанов благодаря получаемому от Солнца теплу.

Энергия же солнечного излучения, как мы увидим позже, — это энергия электромагнитного поля.



Рис. 40.9. Распределение электрических зарядов в грозовом облаке и у поверхности Земли



Рис. 40.10. Гигантская природная электрическая батарея. Вы видите здесь ее зарядку

КАК ЗАЩИТИТЬСЯ ОТ МОЛНИИ?

Молния «ищет» путь наименьшего сопротивления, если под сопротивлением понимать *электрическое* сопротивление. Поэтому она так «любит» высокие металлические острия. Чтобы молния не принесла вреда и ушла в землю, ударив в такое острие, острие надо заземлить, соединив его металлическим проводником с достаточно глубокими (влажными) пластами земли.

Именно так и устроен молниеотвод¹, предложенный Бенджамином Франклином и используемый ныне во всем мире.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Потенциалом** электростатического поля ϕ в данной точке называют физическую величину, равную отношению потенциальной энергии W_p заряда q , помещенного в данную точку поля, к значению этого заряда: $\phi = \frac{W_p}{q}$. Потенциал поля является скалярной величиной и представляет собой энергетическую характеристику электростатического поля.

¹ Молниеотвод до сих пор часто называют громоотводом, что неправильно, так как он предохраняет не от грома, а от молнии.

- **Разность потенциалов** между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении заряда из начальной точки в конечную к значению этого заряда: $\phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q}$. Разность потенциалов называют также **напряжением**.
- **Связь между разностью потенциалов и напряженностью:** в однородном электростатическом поле с напряженностью \vec{E} разность потенциалов между точками, соединенными вектором \vec{d} , направление которого совпадает с направлением напряженности поля, определяется формулой $U = Ed$. Соотношение между напряженностью и разностью потенциалов можно записать также в виде $E = \frac{U}{d}$.
- **Эквипотенциальными поверхностями** называют поверхности равного потенциала.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое потенциал электростатического поля?
2. Что такое разность потенциалов? Какая разность потенциалов представляет опасность для жизни?
3. Как связана разность потенциалов с напряженностью поля в случае однородного поля?
4. Как направлена напряженность поля: в сторону возрастания или убывания потенциала?
5. Что такое эквипотенциальные поверхности? Приведите примеры таких поверхностей в однородном электростатическом поле и в поле точечного заряда.
- 6*. На рисунке изображены линии напряженности электрического поля и точки A, B, C, D. Между какими точками напряжение равно нулю? Между какими точками напряжение наибольшее?
- 7*. Чему равна разность потенциалов между двумя точками, расположенными на поверхности изолированного проводника? Можете ли вы обосновать свой ответ?
- 8*. Как изменяется потенциальная энергия отрицательного заряда, удаляющегося от другого отрицательного заряда: увеличивается или уменьшается? Обоснуйте свой ответ.
- 9*. Как надо перемещать точечный заряд в поле заряженного шара, чтобы потенциальная энергия этого заряда не изменялась? Обязательно ли этот заряд должен двигаться по окружности?

§ 41. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Электроемкость
2. Энергия электрического поля

Мы введем характеристику проводника, показывающую, какой заряд можно «накопить» на этом проводнике при заданном потенциале проводника. Она называется электроемкостью.

Мы увидим, что на двух близко расположенных проводниках можно накопить большие разноименные заряды.

Будет рассмотрен также вопрос об энергии электрического поля.

1. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ УЕДИНЕННОГО ПРОВОДНИКА

Потенциал проводника зависит от его заряда.

Установим вид этой зависимости для уединенного проводника, то есть проводника, расположенного настолько далеко от других заряженных тел, что в месте нахождения нашего проводника полем других зарядов можно пренебречь.

Докажем, что

потенциал уединенного проводника пропорционален его заряду.

Действительно, если увеличить заряд проводника в n раз, то и напряженность поля, создаваемого этим проводником в каждой точке пространства, увеличится также в n раз. Значит, и работа, совершаемая полем проводника при перемещении пробного заряда с поверхности проводника в точку, потенциал которой принят за нуль, увеличится также в n раз. Следовательно, при увеличении заряда проводника в n раз потенциал проводника также увеличился в n раз. Доказательство завершено.

Поскольку потенциал проводника пропорционален его заряду, отношение заряда проводника к его потенциалу не зависит ни от заряда проводника, ни от его потенциала и является поэтому характеристикой самого проводника.

Отношение заряда q уединенного проводника к его потенциалу ϕ , то есть величину $C = \frac{q}{\phi}$, называют электроемкостью проводника.

Чем больше электроемкость проводника, тем больший заряд можно сообщить этому проводнику при заданном потенциале.

Электроемкость проводника увеличивается с его размерами: так, расчеты показывают, что электроемкость шара $C_{ш} = \frac{R}{k}$, где R — радиус шара, k — постоянная, входящая в закон Кулона (см. § 2. Взаимодействие электрических зарядов).

Единица электроемкости

Единицу электроемкости в системе СИ назвали в честь М. Фарадея *фарад* (Ф): $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$. Если проводник имеет электроемкость 1 Ф , то при увеличении его заряда на 1 Кл потенциал проводника увеличивается на 1 В .

Из формулы для электроемкости шара следует, что электроемкость 1 Ф имеет шар радиусом $9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9$ миллионов километров (такой шар примерно в 13 раз больше Солнца). Поэтому для практических целей используют малые доли фарада: микрофарад ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) и пикофарад ($1 \text{ пкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

КОНДЕНСАТОРЫ

В середине 18-го века голландский ученый Питер ван Мушенбрук, работавший в городе Лейдене, поставил опыт, который советовал «ни в коем случае не повторять» своему ученому другу.

В этом опыте, по признанию ученого, его тело «содрогнулось, как от молнии».

Мушенбрук испытал на себе прохождение огромного (по тем временам) электрического заряда, накопленного с помощью... обыкновенной стеклянной банки (рис. 41.1).



Рис. 41.1. Устройство «лейденской банки»

Если выложить внутреннюю поверхность стеклянной банки металлической фольгой и обернуть банку снаружи другим слоем фольги, то на внутреннем и внешнем слоях фольги можно накопить большие разноименные и равные по модулю электрические заряды.

Лейденская банка стала первым *конденсатором*¹ — устройством, специально предназначенным для накопления электрических зарядов.

¹ От латинского «конденсаре» — сгущать.

Конденсатор представляет собой два проводника (обкладки), разделенные тонким слоем диэлектрика (в частности, воздуха).

На обкладки конденсатора помещают равные по модулю разноименные электрические заряды. В таком случае, как вы уже знаете (см. § 38. *Напряженность электрического поля*), поле, создаваемое зарядами на обкладках, сосредоточено в основном между обкладками.

Емкостью конденсатора C называют физическую величину, равную отношению модуля заряда q одной из его обкладок к разности потенциалов (напряжению) U между обкладками: $C = \frac{q}{U}$.

Емкость конденсатора зависит от размеров обкладок и расстояния между ними. Она намного больше емкости уединенного проводника примерно таких же размеров, так как на двух *близко расположенных* проводниках даже при сравнительно небольшой разности потенциалов между ними могут находиться большие заряды противоположного знака.

Плоский конденсатор

Плоский конденсатор представляет собой систему из двух близко расположенных плоских пластин с разноименными равными по модулю зарядами (рис. 41.2).

Расчеты показывают, что емкость плоского воздушного¹ конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, где ϵ_0 — электрическая постоянная, S — площадь одной из пластин, d — расстояние между пластинами.

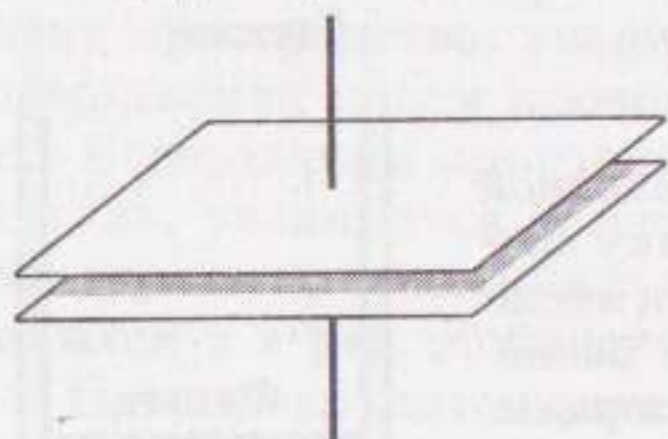


Рис. 41.2. Плоский конденсатор

Расстояние между пластинами можно сделать очень малым, благодаря чему емкость плоского конденсатора может быть весьма большой.

Поставим опыт

Увеличение емкости конденсатора при уменьшении расстояния между его пластинами можно наглядно продемонстрировать на следующем опыте.

¹ Воздушным называют конденсатор, между обкладками которого находится воздух.

Соединим одну из пластин школьного демонстрационного конденсатора с корпусом электрометра, а другую — с его стержнем (рис. 41.3, а).

Зарядим конденсатор, коснувшись наэлектризованной палочкой пластины, соединенной со стержнем электрометра. Электрометр покажет, что между пластинами возникла разность потенциалов.

При сближении пластин показание электрометра будет уменьшаться (рис. 41.3, б). Это означает, что при уменьшении расстояния между пластинами разность потенциалов U между ними уменьшается. Так как емкость $C = \frac{q}{U}$, а заряды пластин остались неизменными, отсюда следует,

что при уменьшении расстояния между пластинами емкость конденсатора *увеличивается*.

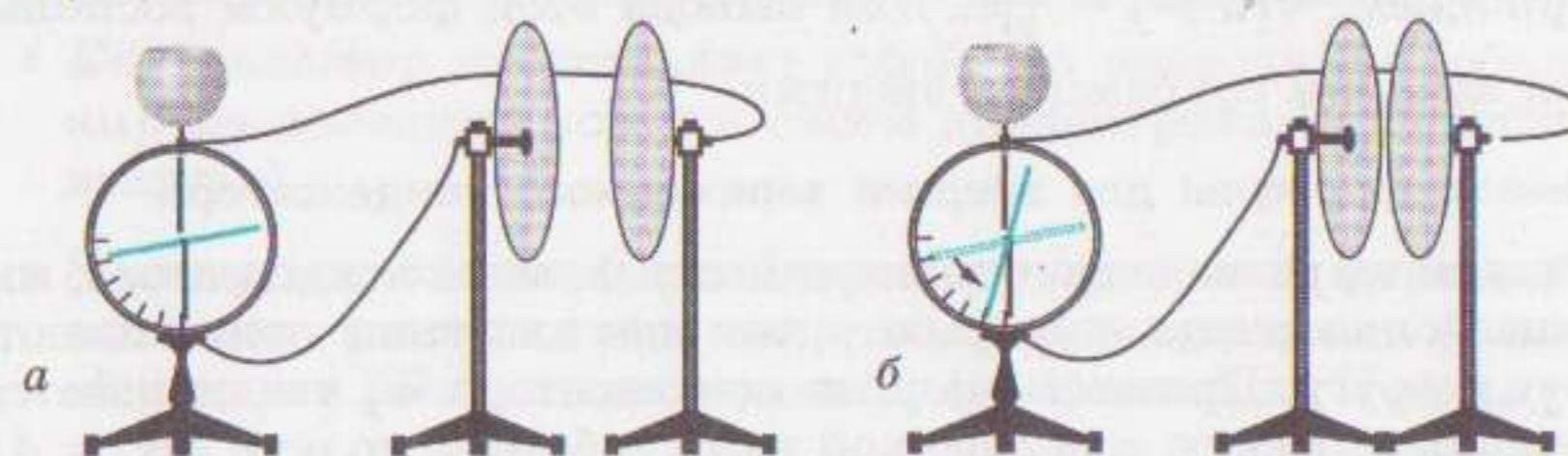


Рис. 41.3. При сближении пластин разность потенциалов между ними уменьшается, то есть емкость конденсатора увеличивается

Как зависит емкость конденсатора от диэлектрической проницаемости диэлектрика?

Заполним пространство между обкладками конденсатора диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ .

Вследствие поляризации диэлектрика напряженность поля в конденсаторе уменьшится при этом в ϵ раз (см. § 39. *Проводники и диэлектрики в электростатическом поле*).

Разность потенциалов пропорциональна напряженности поля (см. § 40. *Потенциал и разность потенциалов*), поэтому при уменьшении напряженности поля между обкладками конденсатора в несколько раз во столько же раз уменьшается и разность потенциалов между обкладками.

А поскольку емкость $C = \frac{q}{U}$, отсюда следует, что при заполнении пространства между обкладками конденсатора диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ емкость конденсатора в ϵ раз *увеличивается*.

2. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Конденсаторы используют сегодня в основном не как «накопители» электрического заряда, а как «накопители» *энергии* электрического поля. Замечательным свойством конденсатора

является его «мобильность»: он может накапливать и отдавать энергию почти мгновенно.

Благодаря этому конденсаторы находят сегодня широчайшее применение — особенно в радиотехнике. Без них была бы невозможной радиосвязь, то есть не работали бы ни телевизоры, ни мобильные телефоны.

ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Энергия заряженного конденсатора W_p выражается через заряд конденсатора q и емкость C .

Докажем, что $W_p = \frac{q^2}{2C}$. Для вывода этой формулы воспользуемся законом сохранения энергии.

Вывод формулы для энергии заряженного конденсатора

Раздвигая разноименно заряженные пластины конденсатора, мы совершаем положительную работу, так как пластины притягиваются друг к другу. При этом энергия конденсатора W_p увеличивается на величину, равную совершенной нами работе A , то есть $\Delta W_p = A$.

Если увеличить расстояние между пластинами на Δd , то совершенная работа $A = F\Delta d$, где F — сила притяжения пластин, равная заряду q одной из пластин, умноженному на напряженность поля, создаваемого другой пластиной. Обе пластины дают равный вклад в напряженность поля E внутри конденсатора, поэтому напряженность поля, создаваемого одной пластиной, равна $\frac{E}{2}$. Таким образом, $F = \frac{qE}{2}$, откуда $A = \frac{qE\Delta d}{2}$.

Если начальное расстояние между пластинами равно нулю, а конечное равно d , то совершенная при раздвигании пластин работа $A = \frac{qEd}{2}$. Это и есть энергия заряженного конденсатора. Так как $Ed = U$, где U — разность потенциалов между обкладками конденсатора, получаем $W_p = \frac{qU}{2}$.

Поскольку U и q связаны соотношением $C = \frac{q}{U}$, получаем три эквивалентные формулы для энергии заряженного конденсатора:
$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Мы уже знаем, что заряженные тела взаимодействуют посредством электрического поля. Как же связана потенциальная энергия взаимодействия заряженных частиц с энергией электрического поля?

Расчеты показывают, что потенциальная энергия заряженных частиц является частью энергии электромагнитного поля.

Например, раздвигая притягивающиеся пластины заряженного конденсатора, мы совершаем работу, увеличивая потенциальную энергию пластин. При этом увеличивается и объем пространства, занятый электрическим полем.

В курсе физики 11-го класса мы увидим, что энергией обладает и магнитное поле, создаваемое движущимися электрическими зарядами и электрическими токами.

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

- **Конденсатор** представляет собой два проводника (обкладки), разделенные тонким слоем диэлектрика (в частности, воздуха).
- **Емкостью C конденсатора** называют физическую величину, равную отношению модуля заряда q одной из его обкладок к разности потенциалов (напряжению) U между обкладками: $C = \frac{q}{U}$.
- **Емкость плоского конденсатора** $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$, где S — площадь одной из пластин, d — расстояние между пластинами, ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего конденсатор, ϵ_0 — электрическая постоянная.
- Энергия заряженного конденсатора: $W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое емкость уединенного проводника?
2. Как называется единица емкости? Какие единицы емкости используют на практике?
3. Что такое конденсатор? Для чего он используется?
4. Что такое емкость конденсатора?
5. Чему равна емкость плоского конденсатора?
6. Как зависит емкость конденсатора от диэлектрической проницаемости диэлектрика?
- 7*. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
- 8*. Одноименно заряженные тела сближают. Какую работу при этом совершают силы электрического поля — положительную или отрицательную? Как изменяется энергия электрического поля: увеличивается или уменьшается?

- 9*. Можно ли увеличить энергию заряженного конденсатора, не изменяя заряда его пластин?
- 10*. Пластины плоского конденсатора раздвигают при неизменной разности потенциалов пластин (например, его пластины подключены к полюсам батарейки). Как изменяется при этом заряд на пластинах? Как изменяется энергия конденсатора?



ГЛАВНОЕ В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Напряженностью** \vec{E} электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы \vec{F} , действующей со стороны электрического поля на точечный пробный заряд q , помещенный в данную точку поля, к значению этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Напряженность поля является **векторной величиной** и представляет собой **силовую характеристику** электрического поля.
- **Принцип суперпозиции электрических полей**: напряженность поля \vec{E} , созданного в данной точке несколькими зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым из зарядов: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$
- **Линиями напряженности** электрического поля называют воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением напряженности электрического поля. Линии напряженности электростатического поля непрерывны. Они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Густота линий напряженности пропорциональна модулю напряженности поля.
- Заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться в веществе, называют свободными зарядами. Вещества, содержащие свободные заряды, называют **проводниками**. Лучшие проводники — **металлы**, в которых свободными зарядами являются электроны.
- **Напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю**, если заряды находятся в равновесии.
- Вещества, в которых свободные заряды отсутствуют, называют **диэлектриками**. Вследствие поляризации диэлектри-

ка **напряженность электростатического поля внутри диэлектрика уменьшается**. Величину, показывающую, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля внутри однородного диэлектрика, называют **диэлектрической проницаемостью** и обозначают ϵ .

- **Потенциалом** электростатического поля ϕ в данной точке называют физическую величину, равную отношению потенциальной энергии W_p заряда q , помещенного в данную точку поля, к значению этого заряда: $\phi = \frac{W_p}{q}$. Потенциал поля является скалярной величиной и представляет собой энергетическую характеристику электростатического поля.
- **Разность потенциалов** между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда: $\phi_1 - \phi_2 = \frac{A}{q}$. Разность потенциалов называют также **напряжением**.
- **Связь между разностью потенциалов и напряженностью**: в однородном электростатическом поле с напряженностью \vec{E} разность потенциалов между точками, соединенными вектором \vec{d} , направление которого совпадает с направлением напряженности поля, определяется формулой $U = Ed$. Соотношение между напряженностью и разностью потенциалов можно записать также в виде $E = \frac{U}{d}$.
- **Эквипотенциальными поверхностями** называют поверхности равного потенциала.
- **Конденсатор** представляет собой два проводника (обкладки), разделенные тонким слоем диэлектрика (в частности, воздуха).
- **Емкостью конденсатора** C называют физическую величину, равную отношению модуля заряда q одной из его обкладок к разности потенциалов (напряжению) U между обкладками: $C = \frac{q}{U}$.
- **Емкость плоского конденсатора** $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$, где S — площадь одной из пластин, d — расстояние между пластинами, ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего конденсатор, ϵ_0 — электрическая постоянная.
- Энергия заряженного конденсатора: $W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ «СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ»

1. В однородное электрическое поле внесли металлический шар. Изобразите схематически, какое распределение зарядов произойдет на шаре.
2. Когда положительно заряженную палочку поднесли к гильзе, она притянулась к палочке. Какой вывод отсюда можно сделать о заряде гильзы?
3. После обработки поверхности специальным раствором, образующим очень тонкий проводящий слой, на эту поверхность оседает гораздо меньше пыли. Как это объяснить?
4. Приведите пример, когда одна из эквипотенциальных поверхностей поля, созданного двумя точечными зарядами, представляет собой плоскость.
5. При раздвигании зарядов энергия создаваемого ими электрического поля увеличивается. Одноименные это заряды или разноименные?
6. Площадь пластин плоского конденсатора увеличили в 2 раза. Как надо изменить расстояние между пластинами, чтобы емкость конденсатора увеличилась в 8 раз?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ¹

1. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Цель работы: измерить ускорение шарика, скатывающегося по наклонному желобу.

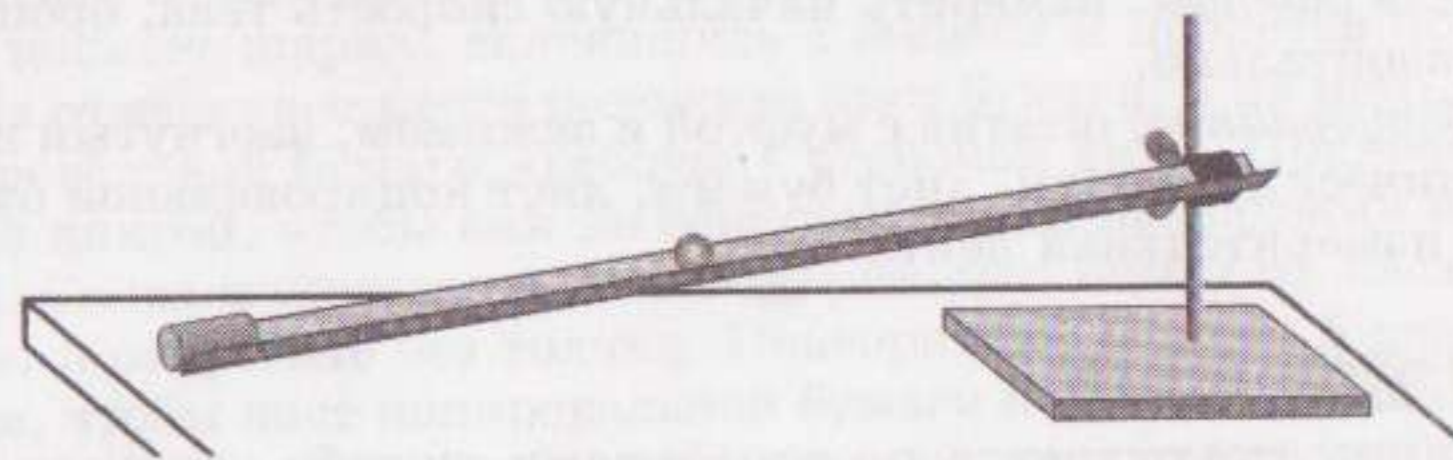
Оборудование: металлический желоб, штатив с муфтой и зажимом, стальной шарик, металлический цилиндр, измерительная лента, секундомер или часы с секундной стрелкой.

Описание работы

Движение шарика, скатывающегося по желобу, приближенно можно считать равноускоренным. При равноускоренном движении без начальной скорости модуль перемещения s , модуль ускорения a и время движения t связаны соотношением $s = \frac{a^2 t^2}{2}$. Поэтому, измерив s и t , мы можем найти ускорение a по формуле $a = \frac{2s}{t^2}$. Чтобы повысить точность измерения, ставят опыт несколько раз, а затем вычисляют средние значения измеряемых величин.

Ход работы

1. Соберите установку, изображенную на рисунке (верхний конец желоба должен быть на несколько сантиметров выше нижнего). Положите в желоб у его нижнего конца металлический цилиндр. Когда шарик, скатившись, ударится о цилиндр, звук удара поможет точнее определить время движения шарика.



¹ Раздел «Лабораторные работы» написан совместно с Л. А. Кириком и И. М. Гельфгатом. В состав комплекта «Физика-10» входит тетрадь для лабораторных работ, пользуясь которой вам будет удобнее выполнять эти работы. В этой тетради приведены также методы расчета погрешностей.

2. Отметьте на желобе начальное положение шарика, а также его конечное положение — верхний торец металлического цилиндра.

3. Измерьте расстояние между верхней и нижней отметками на желобе (модуль s перемещения шарика) и результат измерения запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	$s, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$t_{\text{cp}}, \text{ с}$	$a, \text{ м/с}^2$

4. Выбрав момент, когда секундная стрелка находится на делении, кратном десяти, отпустите шарик без толчка у верхней отметки и измерьте, какое время t пройдет до удара шарика о цилиндр.

Повторите опыт 5 раз, записывая в таблицу результаты измерений. При проведении каждого опыта пускайте шарик из одного и того же начального положения, а также следите за тем, чтобы верхний торец цилиндра находился у соответствующей отметки.

5. Вычислите $t_{\text{cp}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$ и результат запишите в таблицу.

6. Вычислите ускорение, с которым скатывался шарик: $a \approx \frac{2s}{t_{\text{cp}}^2}$. Результат вычислений запишите в таблицу.

7. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

2. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Цель работы: измерить начальную скорость тела, брошенного горизонтально.

Оборудование: штатив с муфтой и зажимом, изогнутый желоб, металлический шарик, лист бумаги, лист копировальной бумаги, отвес, измерительная лента.

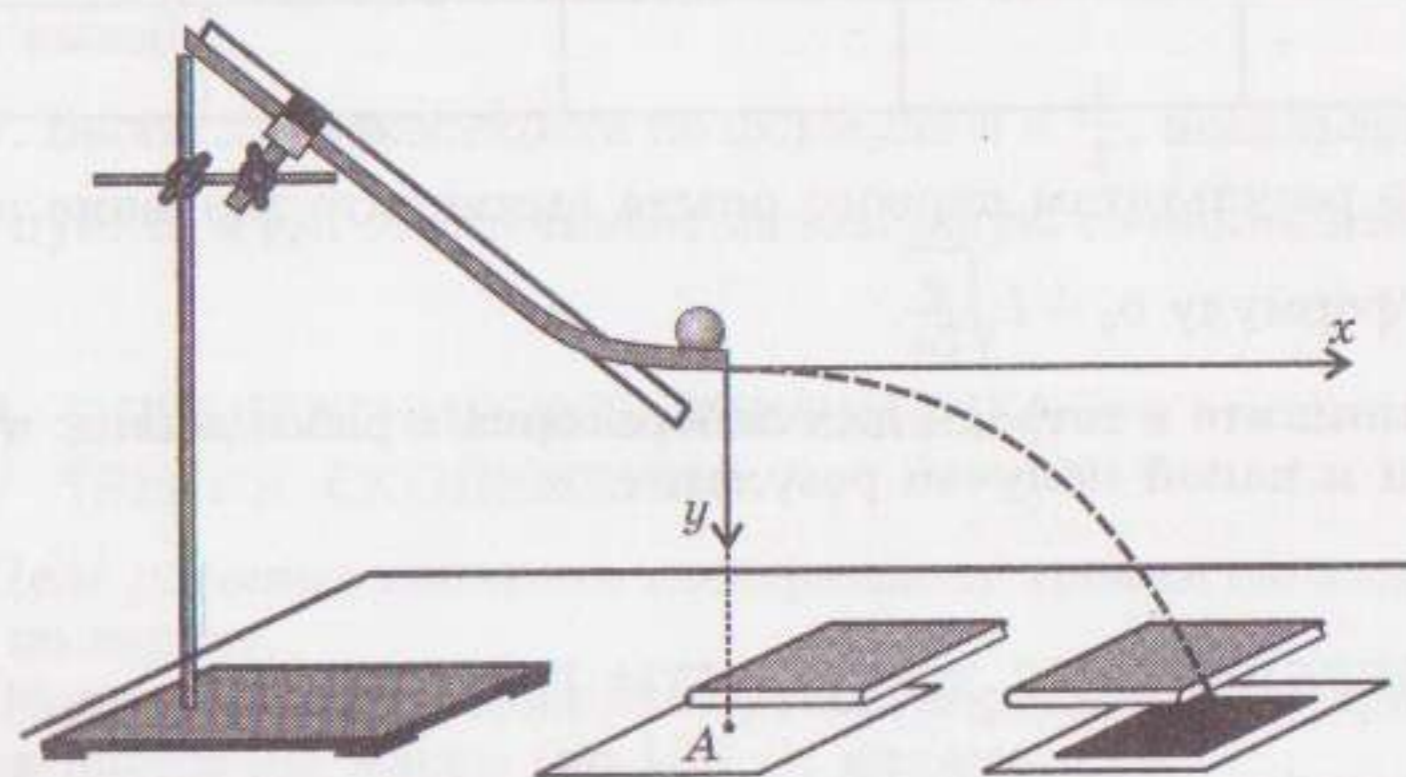
Описание работы

Шарик скатывается по изогнутому желобу, нижняя часть которого горизонтальна. После отрыва от желоба шарик движется по параболе, вершина которой находится в точке отрыва шарика от желоба. Выберем систему координат, как показано на рисунке. Начальная высота шарика h и дальность полета l связаны

соотношением $h = \frac{gl^2}{2v_0^2}$. Согласно этой формуле при уменьшении начальной высоты в 4 раза дальность полета уменьшается в 2 раза. Измерив h и l , можно найти скорость шарика в момент отрыва от желоба по формуле $v_0 = \sqrt{\frac{gl}{2h}}$.

Ход работы

1. Соберите установку, изображенную на рисунке. Нижний участок желоба должен быть горизонтальным, а расстояние h от нижнего края желоба до стола должно быть равным 40 см. Лапки зажима должны быть расположены вблизи верхнего конца желоба.



2. Положите под желобом лист бумаги, придавив его книгой, чтобы он не сдвигался при проведении опытов. Отметьте на этом листе с помощью отвеса точку A , находящуюся на одной вертикали с нижним концом желоба.

3. Поместите в желоб шарик так, чтобы он касался зажима, и отпустите шарик без толчка. Заметьте (примерно) место на столе, куда попадет шарик, скатившись с желоба и пролетев по воздуху. На отмеченное место положите лист бумаги, а на него — лист копировальной бумаги «рабочей» стороной вниз. Придавите эти листы книгой, чтобы они не сдвигались при проведении опытов.

4. Снова поместите в желоб шарик так, чтобы он касался зажима, и отпустите без толчка. Повторите этот опыт 5 раз, следя за тем, чтобы лист копировальной бумаги и находящийся под ним лист не сдвигались. Осторожно снимите лист копировальной бумаги, не сдвигая находящегося под ним листа, и отметьте какую-либо точку, лежащую между отпечатками. Учтите при этом, что видимых отпечатков может оказаться меньше пяти, потому что некоторые отпечатки могут слиться.

5. Измерьте расстояние l от отмеченной точки до точки А, а также расстояние L между крайними отпечатками.

6. Повторите пункты 1—5, опустив желоб так, чтобы расстояние от нижнего края желоба до стола было равно 10 см (начальная высота). Измерьте соответствующее значение дальности полета и вычислите отношения $\frac{h_1}{h_2}$ и $\frac{l_1}{l_2}$.

7. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	h , м	l , м	$\frac{h_1}{h_2}$	$\frac{l_1}{l_2}$

8. По результатам первого опыта вычислите значение v_0 , используя формулу $v_0 = l\sqrt{\frac{g}{2h}}$.

9. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы: проверить справедливость закона Гука для пружины динамометра и измерить жесткость этой пружины.

Оборудование: штатив с муфтой и зажимом, динамометр с заклеенной шкалой, набор грузов известной массы (по 100 г), линейка с миллиметровыми делениями.

Описание работы

Согласно закону Гука модуль F силы упругости и модуль x удлинения пружины связаны соотношением $F = kx$. Измерив F и x , можно найти жесткость k по формуле $k = \frac{F}{x}$.

Ход работы

1. Закрепите динамометр в штативе на достаточно большой высоте.

2. Подвешивая различное число грузов (от одного до четырех), вычислите для каждого случая соответствующее значение $F = mg$, а также измерьте соответствующее удлинение пружины x .

3. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	m , кг	mg , Н	x , м

4. Начертите оси координат x и F , выберите удобный масштаб и нанесите полученные экспериментальные точки.

5. Оцените (качественно) справедливость закона Гука для данной пружины: находятся ли экспериментальные точки вблизи одной прямой, проходящей через начало координат.

6. Запишите в тетради для лабораторных работ сделанный вами вывод.

7. Вычислите жесткость по формуле $k = \frac{F}{x}$, используя результаты пункта 4 (он обеспечивает наибольшую точность измерения).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Цель работы: измерить коэффициент трения скольжения дерева по дереву.

Оборудование: деревянный брусок, деревянная линейка, набор грузов известной массы (по 100 г), динамометр.

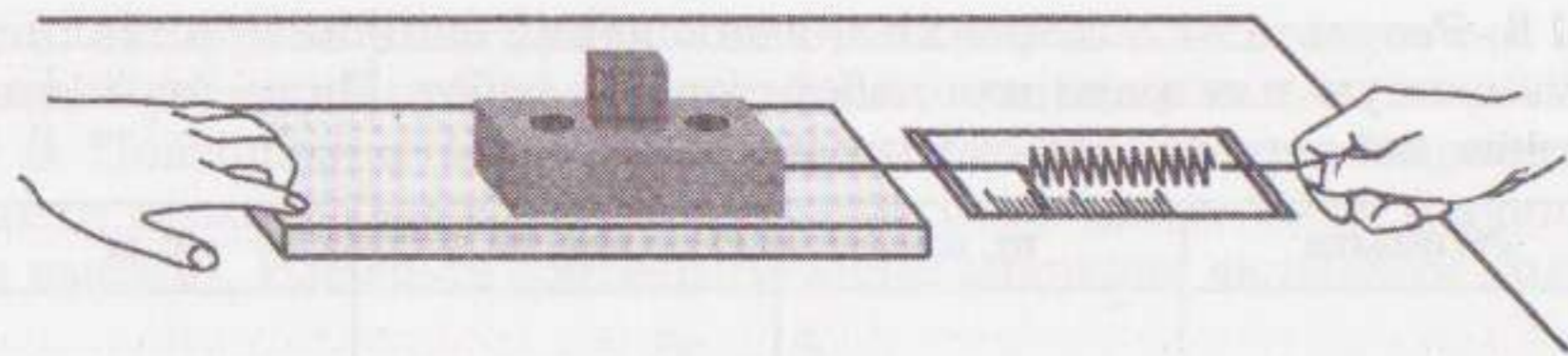
Описание работы

Если тянуть брусок с грузом по горизонтальной поверхности так, чтобы брусок двигался равномерно, прикладываемая к бруску горизонтальная сила равна по модулю силе трения скольжения $F_{тр}$, действующей на брусок со стороны поверхности. Модуль силы трения $F_{тр}$ связан с модулем силы нормального давления N соотношением $F_{тр} = \mu N$. Измерив $F_{тр}$ и N , можно найти коэффициент трения μ по формуле $\mu = \frac{F_{тр}}{N}$. В данном случае сила нормального давления N равна весу P бруска с грузом.

Ход работы

1. Определите с помощью динамометра вес бруска $P_{бр}$ и запишите в приведенную ниже таблицу.

2. Положите брусок на горизонтально расположенную деревянную линейку. На брусок поставьте груз.



3. Поставив на брусок один груз, тяните брусок равномерно по горизонтальной линейке, измеряя с помощью динамометра прикладываемую силу. Повторите опыт, поставив на брусок два и три груза. Записывайте каждый раз в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ, значения силы трения $F_{тр}$ и силы нормального давления $N = P_{бр} + P_{гр}$. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	$P_{бр}, Н$	$N, Н$	$P_{гр}, Н$

4. Начертите оси координат N и $F_{тр}$, выберите удобный масштаб и нанесите полученные три экспериментальные точки.

5. Оцените (качественно), подтверждается ли на опыте, что сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления: находятся ли все экспериментальные точки вблизи одной прямой, проходящей через начало координат.

6. Запишите в тетради для лабораторных работ сделанный вами вывод.

7. Вычислите коэффициент трения по формуле $\mu = \frac{F_{тр}}{N}$, используя результаты пункта 3 (он обеспечивает наибольшую точность), и запишите его значение.

5. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: сравнить изменения потенциальной энергии груза и потенциальной энергии пружины.

Оборудование: штатив с муфтой и зажимом, динамометр с фиксатором, груз, прочная нить, измерительная лента или линейка с миллиметровыми делениями.

Описание работы

Груз весом P привязывают на нити к крючку пружины динамометра и, подняв на высоту h_1 над поверхностью стола, отпускают. Измеряют высоту груза h_2 в момент, когда скорость груза ста-

нет равной нулю (при максимальном удлинении пружины), а также удлинение x пружины в этот момент. Потенциальная энергия груза уменьшилась на $|\Delta E_{гр}| = P(h_1 - h_2)$, а потенциальная энергия пружины увеличилась на $E_{пр} = \frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины,

x — максимальное удлинение пружины, соответствующее самому низкому положению груза. Поскольку часть механической энергии переходит во внутреннюю вследствие трения в динамометре и сопротивления воздуха, отношение $\frac{E_{пр}}{|\Delta E_{гр}|}$ меньше единицы.

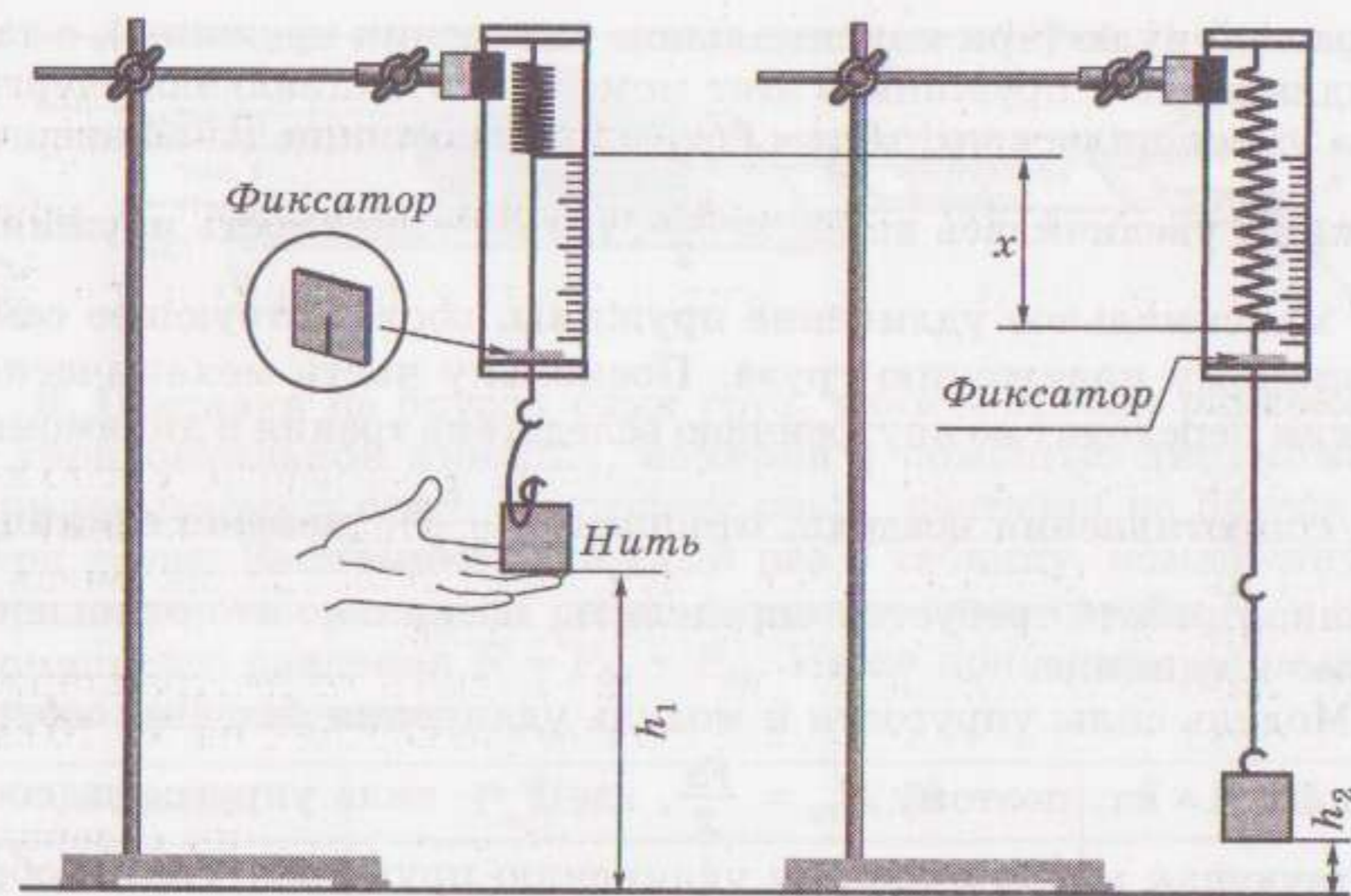
В данной работе требуется определить, насколько это отношение близко к единице.

Модуль силы упругости и модуль удлинения связаны соотношением $F = kx$, поэтому $E_{пр} = \frac{Fx}{2}$, где F — сила упругости, соответствующая максимальному удлинению пружины. Таким образом, чтобы найти отношение $\frac{E_{пр}}{|\Delta E_{гр}|}$, надо измерить P , h_1 , h_2 , F и x .

Для измерения F , x и h_2 необходимо отметить состояние, соответствующее максимальному удлинению пружины. Для этого на стержень динамометра надевают кусочек картона (фиксатор), который может перемещаться вдоль стержня с небольшим трением. При движении груза вниз ограничительная скоба динамометра сдвинет фиксатор, и он переместится вверх по стержню динамометра. Затем, растянув динамометр рукой так, чтобы фиксатор оказался снова у ограничительной скобы, считывают значение F , а также измеряют x и h_2 .

Ход работы

1. Соберите установку, изображенную на рисунке.
2. Привяжите груз на нити к крючку динамометра (длина нити 12—15 см). Закрепите динамометр в зажиме штатива на такой высоте, чтобы груз, поднятый до крючка, при падении не доставал до стола.
3. Приподняв груз так, чтобы нить провисала, установите фиксатор на стержне динамометра вблизи ограничительной скобы.
4. Поднимите груз почти до крючка динамометра и измерьте высоту h_1 груза над столом (удобно измерять высоту, на которой находится нижняя грань груза).
5. Отпустите груз без толчка. Падая, груз растянет пружину, и фиксатор переместится по стержню вверх. Затем, растянув рукой пружину так, чтобы фиксатор оказался у ограничительной скобы, измерьте F , x и h_2 .



6. Вычислите: а) вес груза $P = mg$; б) увеличение потенциальной энергии пружины $E_{пр} = \frac{Fx}{2}$; в) уменьшение потенциальной энергии груза $|\Delta E_{гр}| = P(h_1 - h_2)$.

7. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

$P, Н$	$h_1, м$	$h_2, м$	$F, Н$	$x, м$	$ \Delta E_{гр} , Дж$	$E_{пр}, Дж$	$\frac{E_{пр}}{ \Delta E_{гр} }$

8. Найдите значение отношения $\frac{E_{пр}}{|\Delta E_{гр}|}$.

9. Сравните полученное отношение с единицей и запишите в тетради для лабораторных работ сделанный вывод; укажите, какие превращения энергии происходили при движении груза вниз.

6. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА

Цель работы: измерить ускорение свободного падения с помощью математического маятника.

Оборудование: штатив с муфтой и кольцом, шарик с отверстием, нить, часы с секундной стрелкой, измерительная лента, линейка с миллиметровыми делениями.

Описание работы

Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Поэтому, измерив длину маятника l и период колебаний T , можно определить ускорение свободного падения g по формуле $g = \frac{4\pi^2}{T^2} l$.

Ход работы

1. Установите штатив на краю стола и закрепите у верхнего конца штатива с помощью муфты кольцо. Подвесьте к нему шарик на нити, подобрав длину нити так, чтобы шарик висел на расстоянии нескольких сантиметров от пола.

2. Измерьте расстояние l от точки подвеса до центра шарика.

3. Отклоните шарик от положения равновесия на 5—10 см и отпустите его.

4. Измерьте время t , в течение которого маятник совершает N полных колебаний (удобно взять $N = 40$).

5. Вычислите значение $g_{\text{эсп}} = \frac{4\pi^2 l N^2}{t^2}$.

6. Повторите опыт, уменьшив длину нити в два раза.

7. Результат измерений и вычислений запишите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	$l, м$	N	$t_{\text{сп}}, с$	$g_{\text{эсп}}$

8. Вычислите $g_{\text{сп}}$, усреднив результаты двух опытов.

9. Сравните полученное значение $g_{\text{сп}}$ со значением $g = 9,8 м/с^2$.

10. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

7. ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОЙЛЯ — МАРИОТТА

Цель работы: опытная проверка закона Бойля — Мариотта.

Оборудование: стеклянный цилиндр высотой 50 см, стеклянная трубка длиной 50—60 см, закрытая с одного конца, стакан, пластилин, термометр, линейка, барометр-анероид (один на класс), штатив с лапкой, холодная и горячая вода.

Описание работы

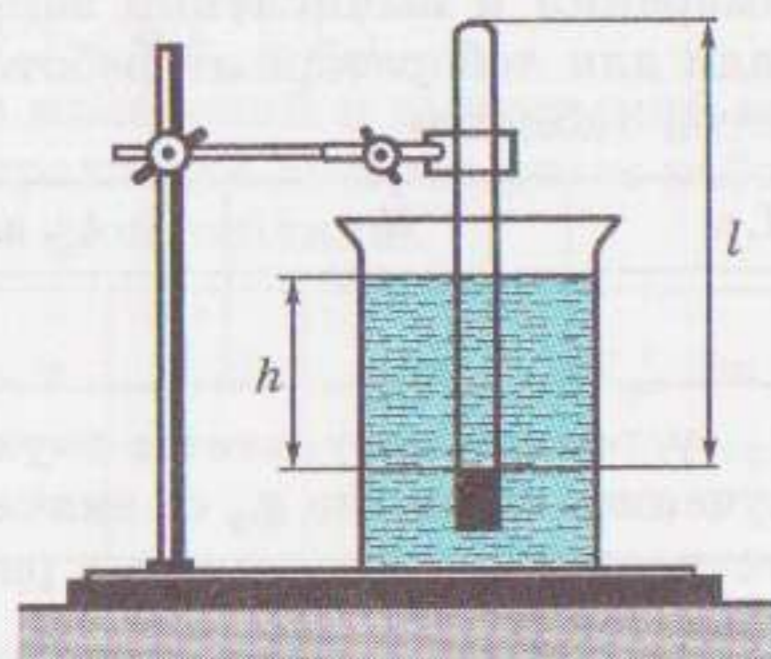
В цилиндр с водой опускают открытым концом вниз трубку (см. рисунок). Если уровень воды в трубке находится ниже уровня воды в сосуде на h , то давление воздуха в трубке равно сумме

атмосферного и гидростатического давления столба воды высотой h . Для упрощения расчетов можно измерять давление в миллиметрах ртутного столба. Тогда с учетом того, что плотность воды в 13,6 раза меньше плотности ртути, для воздуха в трубке можно записать $p = H + \frac{h}{13,6}$, где H — атмосферное давление в миллиметрах ртутного столба, h — разность уровней воды в цилиндре и трубке, измеренная в миллиметрах. В трубке заключена постоянная масса воздуха, который можно считать находящимся при постоянной (комнатной) температуре. Объем и давление воздуха, заключенного в трубке, можно изменять, изменяя глубину погружения трубки. Объем воздуха в трубке $V = l \cdot S$, где l — длина столба воздуха; S — площадь сечения трубки.

Поскольку площадь поперечного сечения трубки постоянна, длина столба воздуха в трубке пропорциональна объему воздуха. Поэтому для проверки закона Бойля — Мариотта достаточно проверить справедливость равенства $\left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l = \text{const.}$

Ход работы

1. Соберите установку (см. рисунок).



2. Измерьте барометром атмосферное давление в мм рт. ст.
3. Погружая в воду трубку открытым концом вниз, измерьте h (повторите опыт три раза).
4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

№ опыта	H , мм рт. ст.	h , мм	l , см	$c = \left(H + \frac{h}{13,6}\right) \cdot l$

5. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

8. ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Цель работы: экспериментально подтвердить уравнение состояния идеального газа.

Оборудование: стеклянная трубка, закрытая с одного конца, два стеклянных цилиндрических сосуда, барометр, термометр, линейка, горячая и холодная вода.

Описание работы

Сначала трубку опускают в сосуд с горячей водой запаянным концом вниз, а затем — в сосуд с холодной водой открытым концом вниз (см. рисунок).

Обозначим температуру горячей воды T_1 , а холодной — T_2 . Тогда два состояния воздуха в трубке описываются параметрами p_1, V_1, T_1 и p_2, V_2, T_2 .

В первом состоянии давление воздуха равно атмосферному давлению, во втором — сумме атмосферного давления и давления водяного столба высотой h : $p_1 = p_{\text{атм}}$; $p_2 = p_{\text{атм}} + \rho gh$.

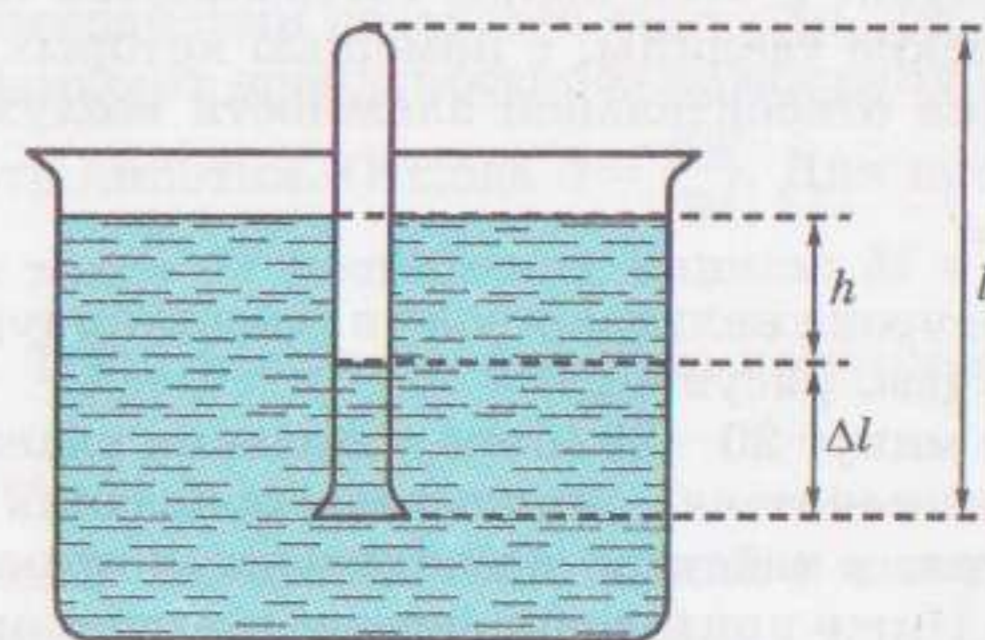
Объем воздуха в трубке в первом состоянии $V_1 = l \cdot S$, где l — длина трубки, S — площадь ее поперечного сечения. Во втором состоянии объем воздуха $V_2 = (l - \Delta l) \cdot S$, где Δl — высота столба воды в трубке.

В работе предлагается проверить выполнение равенства:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 l}{T_1} = \frac{(p_{\text{атм}} + \rho gh) \cdot (l - \Delta l)}{T_2}$$

Ход работы

1. В сосуд с горячей водой опустите трубку закрытым концом вниз (см. рисунок). Когда трубка нагреется и температура воздуха в ней станет равной температуре T_1 воды в сосуде, измерьте температуру горячей воды.



2. Закройте трубку резиновой пробкой на нити и опустите пробкой вниз в сосуд с холодной водой. Под водой выдерните пробку за нитку и опустите трубку до дна сосуда. Измерьте температуру T_2 холодной воды и длину столбика воды в трубке Δl .

3. Определите давление p_1 воздуха в трубке в первом состоянии по показаниям барометра и давление воздуха в трубке во втором состоянии по формуле: $p_2 = p_{\text{атм}} + \rho gh$.

4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

$T_1, \text{К}$	$T_2, \text{К}$	$l, \text{м}$	$\Delta l, \text{м}$	$p_1, \text{Па}$	$p_2, \text{Па}$	$\frac{p_1 l}{T_1}$	$\frac{p_2(l - \Delta l)}{T_2}$

5. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

9. ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: научиться определять влажность воздуха.

Оборудование: психрометр, стакан с водой, психрометрическая таблица.

Описание работы

Психрометр состоит из двух одинаковых термометров, один из которых обмотан тканью. Если водяной пар в воздухе не насыщен, то вода из ткани будет испаряться и показания «влажного» термометра будут меньше, чем сухого.

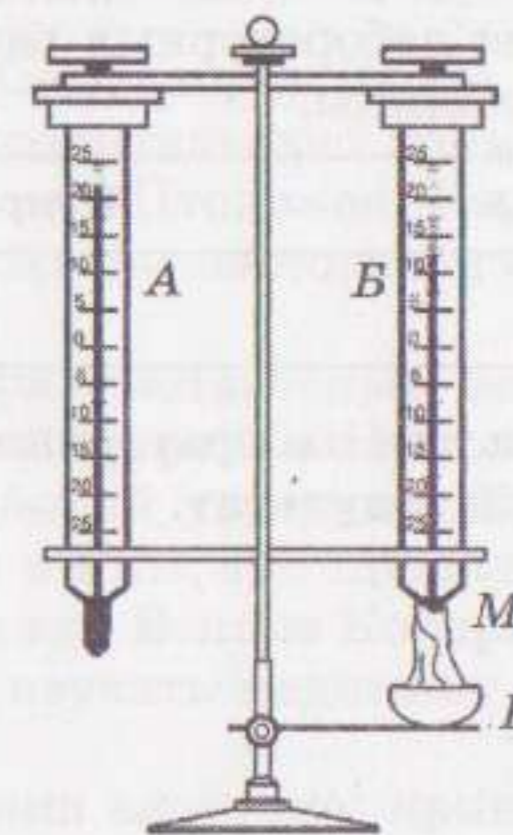
Чем интенсивнее испаряется вода (то есть чем менее насыщен воздух водяным паром), тем ниже показания «влажного термометра». По разнице показаний двух термометров можно измерять влажность воздуха. С этой целью составляются так называемые психрометрические таблицы, с помощью которых находят конкретные значения относительной влажности воздуха.

Ход работы

1. В начале урока наливают воду в резервуар термометра, обернутого марлей (см. рисунок).

2. Выждав минут 20—25 (пока показания влажного термометра перестанут изменяться), записывают показания сухого и влажного термометров в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

$t_{\text{сух}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{влаж}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$



3. С помощью психрометрической таблицы определите относительную влажность воздуха.

4. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Цель работы: экспериментально определить коэффициент поверхностного натяжения методом отрыва капель.

Оборудование: весы учебные, разновес (можно измерительный цилиндр), клин измерительный, пипетка, штангенциркуль, стакан с водой; стакан химический.

Описание работы

Расчеты показывают, что отрыв капли воды от пипетки происходит при выполнении равенства $mg = \sigma \pi d$, где m — масса капли, σ — коэффициент поверхностного натяжения воды, d — внутренний диаметр пипетки. Отсюда $\sigma = \frac{mg}{\pi d}$. Для повышения точности измеряют массу M нескольких капель: $M = m \cdot n$, где n — число капель. Тогда расчетная формула принимает вид $\sigma = \frac{Mg}{n\pi d}$.

Ход работы

1. С помощью измерительного клина и штангенциркуля измерьте внутренний диаметр пипетки d .

2. Накапайте в пустой стакан 100—200 капель воды и с помощью весов (или измерительного цилиндра) определите массу воды M .

3. По приведенной в описании работы формуле вычислите σ .

4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу, помещенную в тетради для лабораторных работ. Ниже приведены первые две строки этой таблицы.

d , м	n	M , кг	σ , Н/м

5. Запишите в тетради для лабораторных работ вывод: что вы измеряли и какой получен результат.

РАССКАЗЫ ОБ УЧЕНЫХ

НИКОЛАЙ КОПЕРНИК (1473—1543)

Как-то королю Кастилии и Леона Альфонсу Мудрому (его прозвали так за покровительство наукам) объясняли сложную геоцентрическую систему Птолемея. Король заметил, что если бы при сотворении мира бог посоветовался с ним, то он сделал бы все проще и лучше.

Но устройство мира действительно оказалось намного проще — и открыл это польский астроном Николай Коперник.

Астрономией Николай увлекся в Краковском университете. В 1500 году он уехал в Рим, где продолжал заниматься астрономией — но не только ею. Вскоре Коперник стал доктором права, продолжая при этом изучать медицину. Впоследствии он успешно лечил больных.

В Польшу Коперник вернулся, принес с собой новые знания и дух эпохи Возрождения. Он был чрезвычайно широко образован: хорошо знал право, медицину, греческий и латинский языки и, главное, астрономию. Он написал короткое сочинение «Николай Коперник о гипотезах небесных движений». В нем в форме аксиом, без математических доказательств, даны основные положения его системы мироздания, которую теперь мы называем «системой Коперника».

Чтобы получить более веские доказательства выдвинутых им положений, Коперник в течение 16 лет вел астрономические наблюдения Солнца, звезд и планет. Жил он в маленьком городке Фрауенбурге (ныне Фромборк). О тех временах сейчас напоминает башня, в которой Коперник прожил тридцать лет и где находилась его обсерватория.

Однако жизнь Коперника протекала не в тихом уединении. Ему пришлось в своей жизни воевать и заниматься политикой, строить укрепления и заниматься реформами. Он организовывал оборону города во время войны.

Накануне своего шестидесятилетия Коперник закончил труд всей своей жизни под названием «Об обращениях небесных сфер». В этой книге Коперник описал наблюдения над движением планет. В ней дано изложение новых представлений о строении Солнечной системы.

Коперник почти десять лет не решался напечатать свою книгу. Наконец после уговоров друзей он согласился отдать ее в печать. Ожидая ее выхода в свет, он тяжело заболел. Первая отпечатанная книга была прислана ему 23 мая 1543 года; он прикоснулся к ней и в ту же ночь умер.

Учение Коперника первым в России оценил М. В. Ломоносов.

ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ (1564–1642)

Отец Галилея был музыкантом — его сочинения исполняют и сегодня. Юный Галилей, выросший в атмосфере искусства, хотел стать художником, но отец за него решил, что более практичным занятием является медицина, и отправил юношу в университет.

Но в университете Галилей увлекся не медициной, а математикой и физикой. Он с увлечением читал сочинения Евклида и Архимеда. Когда Галилею минуло двадцать пять лет, он получил должность преподавателя математики. Но Галилей продолжал заниматься исследованиями, а заинтересовавшие его идеи проверял на опыте. Особенное удовольствие ему доставляли споры с последователями Аристотеля.

Вскоре Галилей принял приглашение стать профессором в университете города Падуя. Никто не мог превзойти его в научных дискуссиях. Уже тогда Галилей начал защищать не признаваемую церковью теорию Коперника. На его лекции собиралось иногда столько людей, что Галилей читал их под открытым небом.

Одно из первых открытий Галилея состояло в том, что период малых колебаний маятника практически не зависит от амплитуды. Он сделал это открытие, еще будучи студентом, когда наблюдал за колебаниями люстр в соборе. У Галилея не было точных часов (именно это его открытие и сделало возможным появление таких часов!), поэтому для отсчета времени он пользовался собственным пульсом.

Изучая движение падающих тел, Галилей предположил, что различие в их падении обусловлено сопротивлением воздуха. И он ставит знаменитый опыт: с Пизанской башни одновременно бросают пушечное ядро и мушкетную пулю. Они достигают поверхности Земли практически одновременно. Этот опыт считают днем рождения физики как опытной науки.

Галилей хотел изучать движение тел под действием силы тяжести, когда тела движутся не так быстро, как при падении. Для этого он сделал наклонный желоб и скатывал по нему шары. Время движения шара Галилей измерял по весу воды, вытекающей из бочки через тонкую трубку. Эти более чем скромные научные приборы позволили Галилею открыть первую количественную закономерность в механике: он установил, что пройденный шаром путь пропорционален квадрату времени движения шара. Так была установлена главная особенность равноускоренного движения. Исходя из этих опытов, Галилей пришел к выводу, что при свободном падении тела также движутся с постоянным ускорением.

Как-то Галилей услышал, что один голландский мастер, занимавшийся изготовлением очков, изобрел трубу, которая приближала удаленные предметы. И Галилей сам сделал первый телескоп. Он наблюдал в телескоп Луну, планеты и звезды, по его

собственным словам, с «невероятным восхищением». На Луне он открыл горы и кратеры — он даже смог оценить высоту лунных гор по их теням! Совершенство телескоп, Галилей открыл, что Млечный Путь — это не туманность, а огромное скопление звезд.

Вблизи Юпитера Галилей обнаружил в телескоп «движущиеся звезды» и догадался, что это — спутники Юпитера. Затем Галилей обнаружил у Венеры фазы, подобные фазам Луны (когда небесное тело освещено Солнцем лишь частично). Это было прямым подтверждением теории Коперника: ведь Венера могла быть видна с Земли в виде серпа только при условии, что она находится между Землей и Солнцем! Галилей обнаружил также пятна на Солнце.

Галилей собрался написать трактат о строении Вселенной, но в это время усилилось недовольство церкви распространением теории Коперника. На Галилея стали нападать в церковных проповедях. Церковные астрономы называли еретическими и ошибочными утверждения, что движется не Солнце, а Земля. На книгу Коперника был наложен запрет.

В это время был избран новый папа, который был другом Галилея. Он предложил ученому написать книгу, в которой содержались бы доказательства как в пользу теории Коперника, так и в пользу того, что Солнце движется вокруг неподвижной Земли.

Галилей написал книгу, которая по обычаям того времени имела форму диалога — беседы между людьми, придерживающимися различных точек зрения.

Диалог ведется между Сальвиати — философом, который излагает точку зрения Коперника с помощью доводов Галилея, Сагредо, который не придерживается той или иной точки зрения предвзято, и Симпличио (в переводе с итальянского «Простак»), который выступает как последователь Аристотеля. Сальвиати каждый раз побеждает Симпличио своими доводами. Эту книгу Галилей написал не на тогдашнем языке науки — латинском, а на итальянском, чтобы она была доступна широкому кругу читателей.

Когда слухи о книге Галилея дошли до Рима, папа приказал инквизиции запретить ее. Отношение папы Римского к Галилею могло ухудшиться из-за внушенного папе подозрения, что простак Симпличио напоминает самого папу.

Уже пожилого больного Галилея вызвали в Рим, чтобы предъявить ему серьезное обвинение: распространение еретического учения. Ему угрожали пытками. Верховный суд церкви настаивал на отречении Галилея от его убеждений. Ученого вызвали на «строгое следствие», откуда он вышел только через три дня. Под сильнейшим давлением ему пришлось отречься от своих убеждений. Стоя на коленях, он подписал отречение, а голову ученого посыпали пеплом.

Существует легенда, согласно которой, поднявшись с колен, Галилей пробормотал: «А все-таки она (Земля) вертится!».

Остаток жизни Галилей прожил под домашним арестом. Но и тут он продолжал заниматься наукой — он написал большую книгу «Две новые науки». Она содержала описание его исследований равноускоренного движения (которые легли затем в основу законов Ньютона). Работая над этой книгой, Галилей лишился зрения, но и это не остановило его: он продолжал работать над книгой с помощью своих учеников. Однако здоровье его все ухудшалось, и в возрасте 78 лет он умер.

ИСААК НЬЮТОН (1643–1727)

Жизнь Ньютона доказывает, что жизненные неудачи следует воспринимать как уроки, из которых надо делать правильные выводы: обращать минусы в плюсы.

Например, Ньютон плохо учился в школе. Но когда его больно ударил одноклассник, Ньютон решил превзойти его в учебе — и стал первым учеником.

Когда Ньютону было 14 лет, мать забрала его из школы, чтобы он помогал ей по хозяйству. Но Ньютон стал учиться по книгам сам и благодаря этому подготовился к поступлению в университет лучше всех.

Когда Ньютон окончил университет, в Лондоне разразилась эпидемия чумы. Но и эта беда не остановила его: он на два года уехал в родную деревню и там в полном одиночестве сосредоточенно работал. Именно в эти годы у него и родились идеи, навсегда прославившие его имя.

Еще мальчиком Ньютон построил действующую модель ветряной мельницы и сделал водяные часы. Он смастерил бумажного змея с фонариками: во время полета змея горели свечи. Когда Ньютон запустил ночью этого светящегося змея, переполох был на всю деревню — все решили, что это комета!

Мать посылала Ньютона по базарным дням в город под приглядом старого слуги для обучения торговле. Однако слуга даже не мог заставить мальчика дойти до города: тот оставался с книгой под деревом на дороге. Возвращаясь с базара, слуга находил его читающим книгу под тем же деревом. Когда мать посылала его в поле пасти овец, он садился под дерево с книгой или мастерил что-то, не обращая на овец никакого внимания.

Так мать Ньютона поняла, что ее сыну надо продолжать учебу. Его опять отправили в школу для подготовки в колледж. Самостоятельные занятия не прошли даром: Ньютон быстро наверстал упущенное и лучше всех подготовился к поступлению в уни-

верситет. В 18 лет Ньютон поступил в Кембриджский университет, где стал вскоре одним из лучших студентов.

В Кембридже он с увлечением изучил трактат Кеплера, посвященный оптике. Он усиленно изучал математику, и вскоре появилась его первая научная работа — он доказал теорему, которую впоследствии назвали «Теоремой о биноме Ньютона». Однако учебу пришлось прервать в связи с разразившейся в Лондоне эпидемией чумы. Ньютон уехал в свою родную деревню Вулсторп.

Там он провел в сосредоточенных размышлениях около двух лет. Для молодого Ньютона Вулсторп оказался таким же «приютом спокойствия, труда и вдохновения», каким оказалось впоследствии Михайловское для молодого Пушкина.

Тогда Ньютон первым разложил солнечный свет в спектр (с помощью стеклянной призмы) и этим доказал, что белый свет — составной. Тогда же Ньютон рассчитал и построил первый зеркальный телескоп, принцип действия которого основан не на преломлении, а на отражении света. Этот небольшой телескоп оказался более сильным, чем прежние линзовые телескопы, благодаря чему Ньютона избрали впоследствии членом Королевского общества (прообраз Академии наук) — задолго до того, как получили признание его великие открытия, преобразившие представление людей о Вселенной.

Будучи глубоко погруженным в научные размышления, Ньютон славился своей рассеянностью. Расскажем в заключение о некоторых забавных случаях, происшедших с ним.

Однажды к нему зашел гость, но ему сказали, что ученый занят исследованиями. Гость сел в столовой ожидать хозяина. Наступило время обеда, и слуга поставил на стол блюдо с жареным цыпленком, накрытое крышкой. Прошел целый час, но Ньютон не появлялся. Почувствовав сильный голод, гость съел цыпленка, накрыл крышкой блюдо с костями и попросил слугу приготовить для хозяина второго цыпленка. Наконец, Ньютон зашел в комнату и поприветствовал гостя. Затем он поднял крышку над блюдом с костями и сказал: «Все-таки мы, ученые, странные люди. Я совершенно забыл, что уже пообедал». В этот момент вошел слуга с цыпленком. Гость пояснил, что произошло. Рассмеявшись от души, ученый приступил к обеду.

Ньютон был точен во всем — например, он требовал, чтобы яйцо варилось по часам строго определенное время. Каково же было удивление его служанки, когда однажды она увидела, что Ньютон, глубоко задумавшись, смотрит на яйцо в своей руке, а часы варятся в кипятке!

Чтобы выпускать и впускать свою любимую кошку, не отвлекаясь от работы, Ньютон прорезал в нижней части двери дыру. Когда же у кошки появились котята, он проделал для каждого котенка еще по маленькому отверстию.

МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛОМОНОСОВ (1711–1765)

Ломоносов родился в 1711 году в деревне вблизи Холмогор Архангельской губернии. С десяти лет Михаил выходил с отцом рыбачить в море.

Полная опасностей жизнь закалила его характер и развила любознательность. «Вратами своей учености» Ломоносов называл первые российские учебники — «Граматику» Смотрицкого и «Арифметику» Магницкого. Эти книги пробудили у юноши жажду знания. Ломоносов вспоминал, что прятался с книгами в уединенных местах, терпел стужу и голод. Зимой 1730 года тайком от домашних он отправился в Москву учиться.

Скрыв свое крестьянское происхождение, Ломоносов поступил в Славяно-греко-латинскую академию. Школьники насмеялись над великовозрастным товарищем. Обучение в академии было рассчитано на тринадцать лет, но Ломоносов овладел всей программой за пять лет, окончив уже в первый год обучения три класса. В ноябре 1735 года его в числе лучших учеников отправили в тогдашнюю столицу — Петербург для дальнейшего обучения.

Через год его посылают для продолжения образования за границу, так как он показал отличные способности и стремление к знаниям. Через пять лет Ломоносов возвратился в Петербург — и еще через пять лет стал первым российским профессором химии. Началась научная деятельность в стенах академии, которая продолжалась почти 25 лет.

Всю свою жизнь Ломоносов посвятил развитию наук в России. Он — создатель первой русской химической лаборатории, автор первого в мире курса физической химии. Он занимался исследованиями по кинетической теории газов и теории теплоты, по оптике, электричеству, тяготению и физике атмосферы, астрономии, географии, металлургии, истории, языкознанию. Ломоносов построил фабрику по производству цветных стекол, организовал производство русского фарфора. Много усилий он приложил для развития металлургии и горной промышленности.

Продолжая исследования американского ученого Бенджамина Франклина, Ломоносов разработал теорию атмосферного электричества. Ломоносовым открыт также существование атмосферы на Венере при наблюдении за прохождением этой планеты по диску Солнца.

Но Ломоносов был не только выдающимся ученым. Он писал стихи и оды, создавал мозаичные картины, писал исторические и географические труды. Некоторое время Ломоносов был даже более известен как поэт и писатель, чем как ученый.

КОНСТАНТИН ЭДУАРДОВИЧ ЦИОЛКОВСКИЙ (1857–1935)

Циолковский был ученым, который полностью «создал себя сам». Он написал книги, которые поражают эрудицией и разно-

образием интересов: «Монизм Вселенной», «Образование солнечных систем и споры о причине космоса», «Отклики литературные», «Ум и страсти», «Исследование мировых пространств реактивными приборами», «Будущее Земли и человечества», «Ракета и космическое пространство».

Циолковский родился в селе Ижевское Рязанской губернии в семье лесничего. В девять лет мальчик тяжело переболел скарлатиной, вследствие чего почти полностью потерял слух. Учиться в школе он не мог, так как почти не слышал учителей. И он начал учиться сам, по книгам.

Когда Косте было десять лет, семья переехала в Вятку, где он поступил в гимназию. Здесь ему повезло: он встретил внимательных учителей, которые помогали мальчику. Однако проучиться в гимназии он смог лишь два года: не хватало денег на оплату обучения. Мальчик был снова предоставлен самому себе и находил утешение лишь в книгах.

Циолковский вспоминал, что лет с четырнадцати-пятнадцати он стал интересоваться физикой, химией, механикой, астрономией, математикой. Но так как книг было мало, он больше погружался в собственные мысли, постоянно обдумывая прочитанное. Многого он не понимал, но это тем более возбуждало самостоятельность ума.

В 16 лет Константин уехал в Москву для продолжения самообразования. Там он прожил три года, живя впроголодь, так как получаемые из дому очень скромные деньги тратил на книги и приборы. Юношу поразило обилие книг в Румянцевской библиотеке (ныне — Российская государственная библиотека). Здесь он самостоятельно изучил математику и физику, высшую алгебру, дифференциальное и интегральное исчисление, аналитическую геометрию.

После возвращения в Вятку Циолковский начал зарабатывать частными уроками, а в свободное время занимался изобретательством (например, построил самоходную лодку).

Через год семья переехала в Рязань. Циолковский сдал экзамены на звание учителя физики и математики и получил право преподавать в уездных училищах. Зимой 1879 года он получил назначение в город Боровск (Калужская губерния).

Работая школьным учителем, Циолковский одновременно работал как инженер и ученый над тремя большими проблемами: 1) созданием цельнометаллического дирижабля; 2) теорией аэроплана; 3) разработкой ракет для межпланетных сообщений.

Дирижабль Циолковского принципиально отличался от предыдущих конструкций тем, что он был цельнометаллическим и поэтому более прочным. Благодаря гофрированной оболочке он мог менять свой объем и, следовательно, поддерживать постоянную подъемную силу на разных высотах. Однако официальная

наука не приняла всерьез разработок «какого-то провинциально-го учителя». Поэтому первый русский дирижабль появился лишь в 1908 году.

В 1894 году Циолковский пишет работу «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина». В этой работе он впервые дает аэродинамический расчет самолета и предлагает конструктивную схему, которая на 15—20 лет опередила технические решения в других странах!

Но основной вклад Циолковский внес в космонавтику: он первым научно обосновал возможность межпланетных сообщений с помощью ракет и реактивного движения. Первая теория полета ракеты с учетом изменения ее массы во время движения была дана в статье Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами» в 1903 году. Аналогичные публикации появились во Франции спустя 10 лет, в Америке спустя 16 лет, в Германии спустя 20 лет.

Затем Циолковский предложил создавать составные ракеты для достижения космических скоростей. Эта его идея воплотилась впоследствии в многоступенчатых ракетах.

Циолковский первым решил задачу о движении корабля в поле тяготения Земли и вычислил необходимые запасы горючего для преодоления силы тяжести. Он рассмотрел влияние атмосферы на полет ракеты, возможность рулевого управления, способ охлаждения стенок камеры сгорания компонентами топлива, проблему создания искусственного спутника Земли, а также предсказал, что будет ощущать космонавт в состоянии невесомости. После своего полета первый космонавт Ю. А. Гагарин подтвердил, что предположения ученого оказались правильными.

Циолковский писал, что мысль использовать ракету для межпланетных полетов была навеяна ему романами французского писателя Жюль Верна. Следуя ему, Циолковский тоже писал научно-популярные и научно-фантастические книги. В книге «Грезы о Земле и небе» Циолковский впервые высказал идею о создании искусственных спутников Земли. Он предложил также создавать в космосе крупные орбитальные станции, где человек мог бы долгое время жить и работать. Сегодня такие станции уже есть на околоземных орбитах.

Ровно через 100 лет после рождения Циолковского и всего через 22 года после его смерти на орбиту был выведен первый искусственный спутник Земли, а еще через четыре года человек совершил первый космический полет.

На памятнике Циолковскому в Калуге написаны его слова: «Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет все околосолнечное пространство».

СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЕВ (1907—1966)

Будучи еще мальчиком, Сергей из старой доски выстрогал яхту — свой первый кораблик, а затем восстановил настоящую старую яхту. Так рождался будущий Главный Конструктор.

Осенью 1924 года Сергей Королев поступает на механический факультет Киевского политехнического института, а через два года переходит в Московское Высшее техническое училище. Он увлекается конструированием летательных аппаратов — сначала планера, на котором летал сам, а затем спортивного самолета.

17 августа 1933 года в небо умчалась первая советская ракета на жидком топливе. Она была создана при участии совсем еще молодого Королева. Ее полет продолжался всего восемнадцать секунд. Тогда никто, конечно, и подумать не мог, что всего через 24 года в космос умчится первый искусственный спутник Земли. Он будет запущен ракетой, сконструированной Королевым.

Королев говорил, что жить нужно увлеченно. Вспоминая свою встречу с Циолковским, Сергей Павлович говорил: «Я ушел от него с одной мыслью — строить ракеты и летать на них. Всем смыслом моей жизни стало одно — пробиться к звездам».

С. П. Королев разработал несколько управляемых ракет, в том числе крылатую ракету, ракетопланёр, ракетопланы, баллистические ракеты, ракеты-носители. 4 октября 1957 года состоялся полет первого искусственного спутника Земли — и с этого дня человечество ведет отсчет эпохи освоения космоса. А 12 апреля 1961 года Юрий Гагарин стал первым космонавтом Земли.

Наблюдая за полетами космонавтов, Королев волновался так, будто летел сам. Он не спал в ночь перед полетом, все время интересовался настроением и самочувствием космонавтов. Но сами космонавты должны были перед полетом спокойно и крепко спать!

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

Глава 1. Кинематика

1. 9,4 км.
2. При прямолинейном движении в одном направлении; нет.
3. В 2 раза.
4. Нет, потому что только на обратный путь лодке понадобится такое же время, что и плоту, чтобы доплыть от А до Б.
5. 25 см.
6. 5 м; 15 м; 25 м.
7. Ускорению свободного падения; 90° .
8. С высоты 5 м; лишним данным является модуль начальной скорости (но направление начальной скорости существенно!).
9. $v = \frac{1}{3600} \frac{1}{\text{с}}$.
10. 1667 км/ч.

Глава 2. Динамика

1. Воздух (атмосфера) движется вместе с Землей.
2. Поскольку воздушный шар увлекается ветром, скорость ветра относительно воздушного шара равна нулю.
3. Примерно 600 Н.
4. Около $2 \cdot 10^{-7}$ Н.
5. Примерно 10 Н.
6. С такой силой человек притягивает Землю.
7. Может, если его бросить вертикально вверх.
8. Примерно 600 Н.
9. При движении вверх вес пассажира больше силы тяжести, когда лифт разгоняется, и меньше — когда тормозит. При движении вниз вес пассажира меньше силы тяжести, когда лифт разгоняется, и больше — когда тормозит.
10. Около 100 Н.
11. Камень находится в состоянии невесомости во время всего полета.

Глава 3. Законы сохранения в механике

1. Нет: они направлены противоположно.
2. Человек не является в данном случае замкнутой системой: он взаимодействует с Землей. Изменение импульса человека равно по модулю и противоположно по направлению изменению импульса Земли.
3. Вентилятор толкает воздух, сообщая ему некоторый импульс; согласно закону сохранения импульса такой же по модулю, но противоположно направленный импульс получает вентилятор, а вместе с ним — и тележка.
4. Импульс планеты изменяется по направлению; кинетическая энергия не изменяется.

5. Работа равна 30 Дж; потенциальная энергия груза увеличилась на 10 Дж; кинетическая энергия увеличилась на 20 Дж.
6. Импульс увеличился в 2 раза, а кинетическая энергия — в 4 раза.
7. Потенциальная энергия уменьшается; кинетическая энергия остается неизменной; закон сохранения механической энергии не выполняется, так как существенную роль играет трение.
8. В 8 раз.
9. Импульс больше у грузовика, а кинетическая энергия — у легкового автомобиля.
10. Импульс изменил только направление, кинетическая энергия не изменилась.

Глава 4. Механические колебания и волны. Звук

1. 0,2 с.
2. 1 с.
3. 50 Гц; 0,033 Гц.
4. Силы тяжести и силы упругости.
5. 1,5 м/с.
6. Комар совершает более частые взмахи крылышками.

Глава 5. Молекулярная физика

1. 2; около 11.
2. 310 К.
3. 27°C .
4. Уменьшилось в 4 раза.
5. Не изменилась.
6. Уменьшился в 6 раз.
7. Уменьшилось в 9 раз.
8. Увеличилась в 3 раза.

Глава 6. Термодинамика

1. Нет.
2. Нет, максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя меньше 100%.
3. Отдает.
4. При изотермическом, потому что при этом газ совершает работу при расширении.
5. При изотермическом.
6. Да, если газ расширяется так, что работа, совершенная газом, больше переданного газу количества теплоты.
7. С поверхности капли происходит интенсивное испарение, и между каплей и сковородой возникает слой водяного пара.
8. Влияет только на показание мокрого термометра — оно будет уменьшаться вследствие более быстрого испарения.

Глава 7. Электрические взаимодействия

2. В сторону заряженного тела.
3. Будет и к тому, и к другому.
4. Увеличилась в $\frac{4}{3}$ раза.
5. $4 \cdot 10^{42}$.
6. На прямой, проходящей через заряды, в точке, находящейся на расстоянии 1 м от заряда q и на расстоянии 2 м от заряда $-4q$.
7. Нет, потому что направление напряженности поля определяет направление силы, действующей на заряженную частицу, а не направление ее скорости.

Глава 8. Свойства электрического поля

2. Она могла быть либо незаряженной, либо заряженной отрицательно.
3. Заряды со всего проводящего слоя снимаются, например, при прикосновении рукой.
4. Поле создается разноименными и одинаковыми по модулю зарядами; эквипотенциальная поверхность, проходящая через середину отрезка, соединяющего заряды и перпендикулярного к нему, является плоскостью.
5. Разноименные.
6. Уменьшить в 4 раза.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютный нуль 193
Авогадро А. 200
Амплитуда волны 167
— колебаний 156
Аристотель 46
Атомная единица массы 185
Бойль Р. 198
Больцман Л. 200
Бор Н. 7
Браге Тихо 81
Брун Р. 179
Бруно Джордано 60
Ватт 132
Величины векторные 20
Вес 75, 91, 94
— покоящегося тела 91
— тела, движущегося с ускорением 92
«Вечный двигатель» второго рода 247
Взаимодействие молекул 181
Влажность относительная 262
Волны звуковые 171
— механические 167
— поперечные 170
— продольные 170
Вольт — единица разности потенциалов 303
Вольта А. 303
Высота звука 172
Гагарин Ю. А. 127
Газ идеальный 203
Газы 216
Галилей Галилео 27, 47, 49, 53, 60, 87
Гей-Люссак Ж. 196
Гельмгольц Г. 142
Герц (единица измерения) 157
Гилберт В. 269
Гипотеза научная 25
Границы применимости законов и теорий 7
Графики изопроцессов 209
Графическое нахождение работы газа 250
Громкость звука 172
Гук Р. 66
Двигатель тепловой 237
— — идеальный 240
— —, основные элементы 238
Движение броуновское 179, 180
— криволинейное 18, 32
— молекул 179
— планет 58, 72
— по окружности 19, 41
— — — неравномерное 148
— — — равномерное 32
Движение поступательное 11
— прямолинейное равномерное 23
— — равноускоренное 26
— реактивное 122
— связанных тел 109
— тела, брошенного под углом к горизонту 31
Децибел 173
Джоуль (единица измерения) 129, 136
Джоуль Дж. 142, 234
Динамика 45
Диффузия 181
Диэлектрики 295
Диэлектрическая проницаемость 298
Длина волны 167
Дюфе Ш. 269
Жидкости 216, 220
Закон Авогадро 200
— Бойля — Мариотта 198
— всемирного тяготения 81, 105
— Гей-Люссака 196
— Гука 66
— инерции 49
— Кеплера третий 81, 105
— Кулона 277
— научный 6
— Ньютона
— — второй 70, 116
— — первый 52

— — третий 74, 76
— сохранения заряда 272
— — импульса 116
— — механической энергии 140
— — энергии 139, 233
— термодинамики второй 246
— — первый 233
— физический 6
— Шарля 197
Законы газовые 196
Заряд электрона 272
Звук 171
Золотое правило механики 129
Идеализация научная 5
Изобара 196, 209
Изопроцессы 196
Изотерма 198, 209
Изохора 198, 209
Импульс (импульс тела) 116
Импульс силы 116
Инертность 69
Интерференция волн 169
Инфразвук 172
Ион 272
Ионосфера 307
Иоффе А. Ф. 279
Испарение 257
Кавендиш Г. 83
Капиллярность 222
Карно С. 142, 234, 237, 239
Кельвин (единица измерения) 193
Кельвин У. 193
Кеплер И. 81
Кинематика 9
Кипение 260
Клаузиус Р. 204, 246
Колебания вынужденные 163
— гармонические 158
— затухающие 163
— механические 156
— свободные 157, 159
Количество вещества 186
— теплоты 233
Конденсатор 311
Конденсация 258
Кондиционер 241
Концепция близкого действия 280
— дальнего действия 280

Коперник Н. 58
Королев С. П. 127
Коэффициент поверхностного натяжения 221
— полезного действия 254
— — — теплового двигателя 239
— — — — — максимально возможный 239
— трения 97
Кризис экологический 247
— энергетический 247
Кристаллизация 256
Кристаллическая решетка 217, 219
Кристаллы 217
Кристаллы жидкие 223
Кулон — единица электрического заряда 277
Кулон Ш. 276
Ломоносов М. В. 142
Майер Р. 141, 234
Мариотт Э. 198
Масса 69
— относительная атомная 186
— — молекулярная 185, 186
— молярная 188
Маятник математический 159
— пружинный 160
Метод познания научный 5
Механика квантовая 7
— классическая 7
Милликен Р. 278
Модель научная 5
— явления 5
Молекулярное строение живых организмов 223
Молекулярно-кинетическая теория, основная задача 183
— — — основное уравнение 204
— — — основные положения 182
Моль 186
Мощность 132, 133
Наблюдение 5
Нагреватель 238
Напряженность 305
— поля точечного заряда 287
— электрического поля 286

Насос тепловой 241
Невесомость 95
Ньютон (единица измерения) 71
Ньютон И. 52, 70, 74, 79, 80
Октава 172
Отвердевание 256
Охрана окружающей среды 248
Пар насыщенный 259
— ненасыщенный 259
Параметры макроскопические 182
— микроскопические 182
Перегрузка 94
Перемещение 14
— при прямолинейном равноускоренном движении 27
Переходы фазовые 256
Период волны 167
— колебаний 157
— обращения 33
Плавление 218, 256
Плазма 223
Поверхностное натяжение 221
Поле электростатическое 281
Ползунов И. И. 237
Поля точечных зарядов 287, 289
Поляризация диэлектриков 297
Порядок ближний 220
— дальний 218
Постоянная Авогадро 187
— Больцмана 201, 206
— гравитационная 81, 83
— универсальная газовая 201
Потенциал электростатического поля 302
Потенциальная энергия заряда 301
Принцип относительности Галилея 53
— соответствия 7
— суперпозиции 288
Проводники 293
Проекция векторных величин 21
Процесс адиабатный 235
— изобарный 196, 235
— изотермический 198, 234
— изохорный 197, 234
— циклический 253
Процессы необратимые 244
— обратимые 244

Психрометр 262
Путь 14
Работа 136
— газа при изобарн. расш. 250
— — при циклическом процессе 251
— механическая 129
— силы трения скольжения 132
— — тяжести 131
— — упругости 132
Равновесие динамическое 259
— тепловое 190
Равнодействующая 70
Размеры атомов 179
— молекул 179
Разность потенциалов 303
Ракета 123
Резерфорд Э. 270
Резонанс 164, 165
Резонанс акустический 173
Роса 262
Румфорд В. 142
Свободное падение 27, 87, 140
Сила 63
— возвращающая 158
— нормальной реакции 75
— сопротивления в жидкостях и газах 101
— трения качения 99
— — покоя 98
— — скольжения 97
— тяжести 71, 82, 94
— упругости 64, 65
Система колебательная 158
— мира гелиоцентрическая 59
— — геоцентрическая 57
— отсчета 10, 14
— —, связанная с Землей 56
— тел замкнутая 116
Системы отсчета инерциальные 51, 52
Скорости молекул 179, 206, 207
Скорость волны 169
— звука в воздухе 171
— космическая вторая 89
— космическая первая 88, 89
— мгновенная 17, 19
— молекул среднеквадратичная 214

— средняя 17
 Сложение скоростей 22
 Смачивание 222
 Смолуховский М. 180
 Состояния агрегатные 216
 — вещества 216
 Спутник связи 104
 Текучесть аморфных тел 220
 Тела аморфные 219
 — твердые 216
 Тело рабочее 238
 Тембр звука 173
 Температура 190
 — абсолютная 193, 205
 — плавления 218, 256
 Теория научная 6
 Теория относительности 7
 — — общая 84
 — света волновая 7
 Теплопередача 233, 245
 Теплота плавления удельная 257
 — парообразования удельная 258
 Термин научный 4
 Термодинамика 229
 Технологии энергосберегающие 248
 Томсон Дж. 270
 Точка материальная 11
 — росы 262
 Траектория 13, 14
 Уатт Д. 237
 Удар 120
 — неупругий 144
 — упругий 145
 Ультразвук 172
 Уравнение Менделеева — Клапейрона 201, 213
 — Клапейрона 200, 212, 213
 — состояния 183
 — — газа 200, 212
 Ускорение 25
 — при равномерном движении по окружности (центростремительное) 33, 34, 41
 — свободного падения 29
 — тела, соскальзывающего с наклонной плоскости 107
 Условие равновесия тела на наклонной плоскости 106
 Фарад — единица емкости 311
 Фарадей М. 280
 Франклин Б. 269
 Холодильник (прибор) 240
 Холодильник (элемент теплового двигателя) 238
 Циолковский К. Э. 126
 Частота волны 167
 — колебаний 157
 — обращения 33
 Шарль Ж. 197
 Шкала Кельвина 193
 — температур абсолютная 193
 — Цельсия 191, 194
 Штерн Отто 207
 Эйнштейн Альберт 7, 83, 180
 Эквипотенциальные поверхности 306
 Эксперимент 5
 — мысленный 6
 Электризация 271
 Электрическая постоянная 277
 Емкость 310
 — конденсатора 312
 Электрон 7, 189
 Электрон-вольт 303
 Элементарный заряд 278
 Энергия 136
 — внутренняя 230, 233
 — кинетическая 138
 — механическая 137
 — молекул средняя кинетич. 205
 — поверхностная 221
 — потенциальная 137
 — электрического поля 314
 Эффект парниковый 248
 Явление инерции 49
 Явления капиллярные 222

ОГЛАВЛЕНИЕ

К учителю и ученику	3
Физика и научный метод познания	4
1. Что и как изучает физика?	4
2. Научный метод познания	5
3. Где используются физические знания и методы?	8
МЕХАНИКА	
Глава 1. КИНЕМАТИКА	9
§ 1. Система отсчета. Траектория, путь и перемещение	10
1. Система отсчета	10
2. Материальная точка	11
3. Траектория, путь и перемещение	13
§ 2. Скорость	17
1. Мгновенная скорость	17
2. Векторные величины и их проекции	20
3. Прямолинейное равномерное движение	23
§ 3. Ускорение. Прямолинейное равноускоренное движение	25
1. Ускорение	25
2. Прямолинейное равноускоренное движение	26
§ 4. Криволинейное движение	31
1. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	31
2. Равномерное движение по окружности	32
§ 5. Примеры решения задач по кинематике	36
1. Переход в другую систему отсчета	36
2. Перемещение при прямолинейном равноускоренном движении	38
3. Движение по окружности	41
Глава 2. ДИНАМИКА	45
§ 6. Закон инерции — первый закон Ньютона	46
1. Ранние представления о причинах движения тел	46
2. Закон инерции и явление инерции	47
3. Инерциальные системы отсчета и первый закон Ньютона	51
§ 7. Место человека во Вселенной	56
1. Система отсчета, связанная с Землей	56
2. Гелиоцентрическая система мира	58
§ 8. Силы в механике. Сила упругости	63
1. Взаимодействия и силы	63
2. Сила упругости	64
3. Закон Гука. Измерение сил с помощью силы упругости	65

§ 9. Сила, ускорение, масса. Второй закон Ньютона	68
1. Соотношение между силой и ускорением	68
2. Примеры применения второго закона Ньютона	71
§ 10. Взаимодействие двух тел. Третий закон Ньютона	74
1. Взаимодействие двух тел	74
2. Примеры применения третьего закона Ньютона	76
§ 11. Всемирное тяготение	79
1. На пути к открытию	79
2. Закон всемирного тяготения	81
§ 12. Движение под действием сил всемирного тяготения	85
1. Движение тел вблизи поверхности Земли	85
2. Движение искусственных спутников Земли и космических кораблей	88
§ 13. Вес и невесомость	91
1. Вес	91
2. Невесомость	95
§ 14. Силы трения	97
1. Сила трения скольжения	97
2. Сила трения покоя	98
3. Сила трения качения	99
4. Сила сопротивления в жидкостях и газах	101
§ 15. Примеры решения задач по динамике	104
1. Движение под действием сил тяготения	104
2. Движение под действием нескольких сил	106
Глава 3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ	115
§ 16. Импульс. Закон сохранения импульса	116
1. Импульс и закон сохранения импульса	116
2. Примеры применения закона сохранения импульса	117
§ 17. Реактивное движение. Освоение космоса	122
1. Реактивное движение	122
2. Развитие ракетостроения и освоение космоса	125
§ 18. Механическая работа. Мощность	129
1. Механическая работа	129
2. Мощность	132
§ 19. Энергия. Закон сохранения механической энергии	135
1. Работа и энергия	135
2. Механическая энергия	137
3. Закон сохранения энергии	139
§ 20. Примеры решения задач на законы сохранения	144
1. Столкновения	144
2. Неравномерное движение по окружности	148

Глава 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	155
§ 21. Механические колебания	156
1. Примеры и характеристики механических колебаний	156
2. Свободные колебания	157
§ 22. Превращения энергии при колебаниях. Резонанс	162
1. Превращения энергии при колебаниях	162
2. Вынужденные колебания	163
§ 23. Механические волны. Звук	167
1. Механические волны	167
2. Звук	171

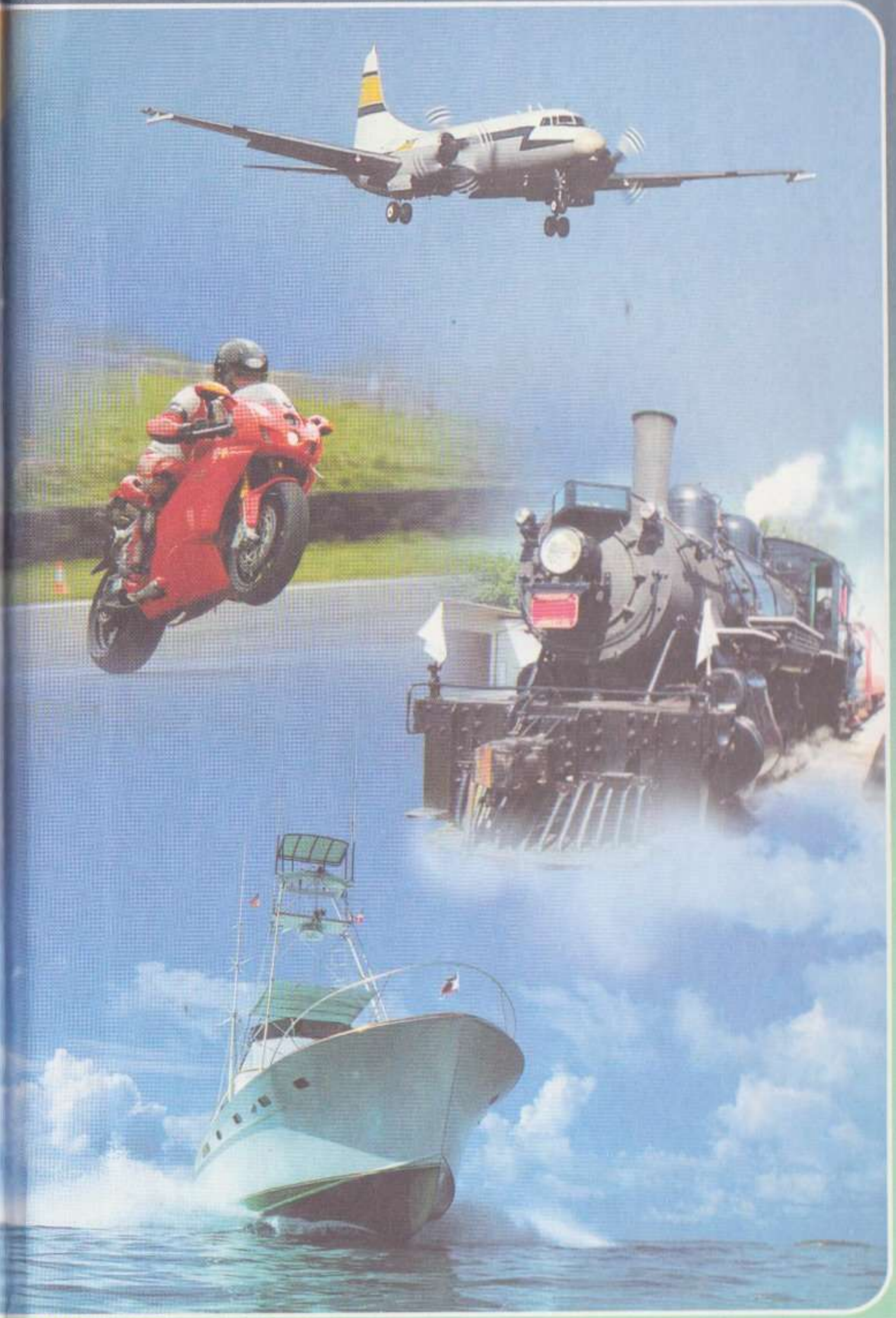
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 5. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	177
§ 24. Молекулярно-кинетическая теория	178
1. Основные положения молекулярно-кинетической теории ...	178
2. Основная задача молекулярно-кинетической теории	182
§ 25. Количество вещества. Постоянная Авогадро	185
1. Относительная молекулярная (атомная) масса	185
2. Количество вещества	186
§ 26. Температура	190
1. Температура и ее измерение	190
2. Абсолютная шкала температур	192
§ 27. Газовые законы	196
1. Изопроцессы	196
2. Уравнение состояния газа	199
§ 28. Температура и средняя кинетическая энергия молекул	203
1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории ...	203
2. Абсолютная температура и средняя кинетическая энергия молекул	205
3. Скорости молекул	206
§ 29. Примеры решения задач по молекулярной физике	209
1. Графики газовых законов	209
2. Уравнение состояния газа	212
3. Скорость и энергия молекул	214
§ 30. Состояния вещества	216
1. Сравнение газов, жидкостей и твердых тел	216
2. Кристаллы, аморфные тела и жидкости	217
3. Другие состояния вещества	223
Глава 6. ТЕРМОДИНАМИКА	229
§ 31. Внутренняя энергия. Первый закон термодинамики	230
1. Внутренняя энергия	230
2. Закон сохранения энергии в тепловых явлениях	233

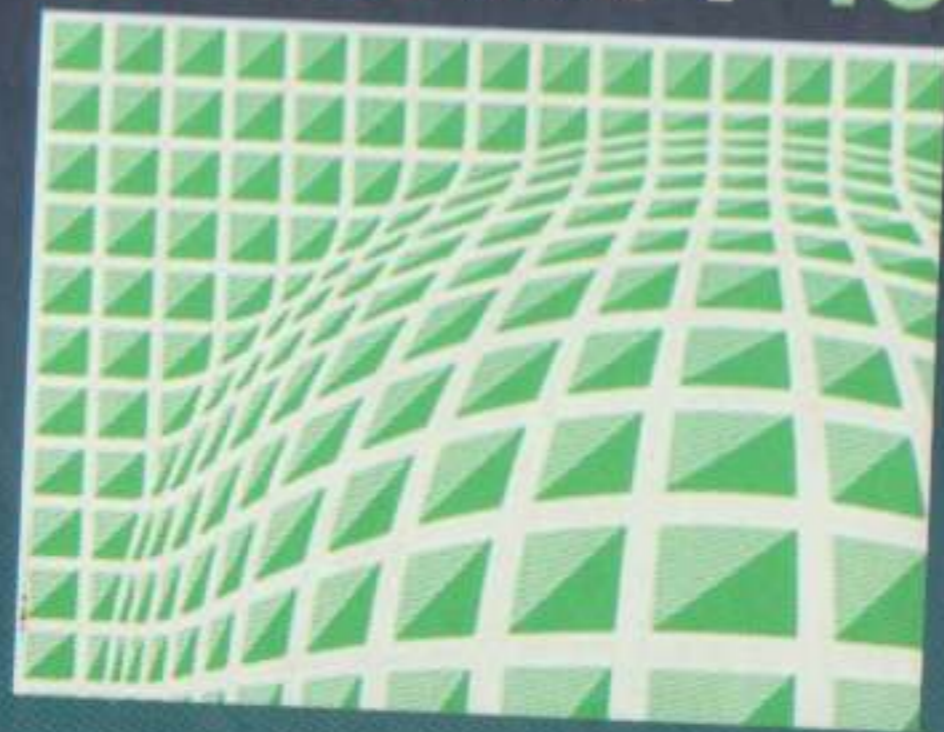
§ 32. Тепловые двигатели, холодильники и кондиционеры	237
1. Тепловые двигатели	237
2. Холодильники и кондиционеры	240
§ 33. Второй закон термодинамики. Охрана окружающей среды . . .	244
1. Необратимость процессов и второй закон термодинамики	244
2. Энергетический и экологический кризисы	247
§ 34. Примеры решения задач по термодинамике	250
1. Нахождение работы газа	250
2. Нахождение переданного газу количества теплоты	252
3. Циклические процессы	253
§ 35. Фазовые переходы	256
1. Плавление и кристаллизация	256
2. Испарение и конденсация	257

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	267
§ 36. Природа электричества	268
1. От электрона-янтаря до электрона-частицы	268
2. Роль электрических взаимодействий	273
§ 37. Взаимодействие электрических зарядов	276
1. Закон Кулона	276
2. Электрическое поле	280
Глава 8. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	285
§ 38. Напряженность электрического поля	286
1. Напряженность электрического поля	286
2. Линии напряженности	288
§ 39. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	293
1. Проводники	293
2. Диэлектрики	295
§ 40. Потенциал и разность потенциалов	301
1. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле	301
2. Потенциал и разность потенциалов	302
3. Связь между разностью потенциалов и напряженностью	304
4. Отчего бывают грозы?	307
§ 41. Емкость. Энергия электрического поля	310
1. Емкость	310
2. Энергия электрического поля	313
Лабораторные работы	319
Рассказы об ученых	333
Ответы на вопросы и задачи	342
Предметно-именной указатель	345



ФИЗИКА • 10



ISBN 978-5-346-01256-6



9 785346 012566

