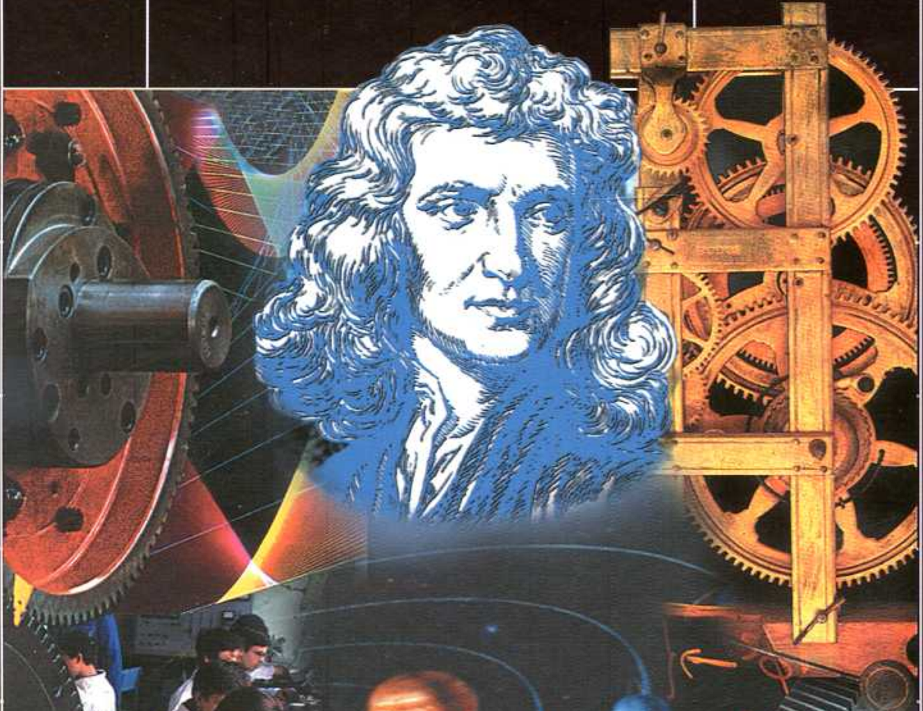
Классический курс

10

физика



+ DVD

ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

ФГОС

Классический курс

Г. Я. Мякишев Б. Б. Буховцев Н. Н. Сотский

физика

10 класс

Учебник для общеобразовательных организаций

с приложением на электронном носителе

Базовый уровень

Под редакцией проф. Н. А. Парфентьевой

Рекомендовано Министерством образования и науки Российской Федерации

Москва
«Просвещение»
2014

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
М99

Серия «Классический курс» основана в 2007 году

Раздел «Механика» («Кинематика», «Динамика», «Законы сохранения в механике» и «Статика») написан **Н. Н. Сотским.**

Разделы «Молекулярная физика. Тепловые явления» и «Основы электродинамики» написаны **Б. Б. Буховцевым** и **Г. Я. Мякишевым.**

На учебник получены положительные заключения по результатам научной (заключение РАН № 10106—5215/20 от 15.10.2013), педагогической (заключения РАО № 01—5/7д—327 от 21.10.2013 и № 418 от 29.01.2014) и общественной (заключение РКС № 415 от 07.02.2014) экспертиз.

Мякишев Г. Я.

М99 Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций с прил. на электрон. носителе : базовый уровень / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский; под ред. Н. А. Парфентьевой. — М. : Просвещение, 2014. — 416 с. : ил. — (Классический курс). — ISBN 978-5-09-028225-3.

В учебнике, начинающем предметную линию «Классический курс», рассмотрены преимущественно вопросы классической физики: классической механики, молекулярной физики, электродинамики.

Учебный материал содержит информацию, расширяющую кругозор учащегося; темы докладов на семинарах, интернет-конференциях; ключевые слова, несущие главную смысловую нагрузку по изложенной теме; образцы заданий ЕГЭ.

Учебник соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего (полного) общего образования и реализует базовый уровень образования учащихся 10 классов.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-09-028225-3

КАК РАБОТАТЬ С УЧЕБНИКОМ

Мы, авторы и редакторы, надеемся, что учебник, который вы держите в руках, станет вашим надёжным помощником (справочником, путеводителем, наставником) в изучении одной из самых важных областей научного знания — физики.

Мы считаем, что только при активной работе с учебным материалом, процесс усвоения новых знаний становится эффективным. Поэтому мы выделили в каждом параграфе важные, с нашей точки зрения, части текста и ввели для них следующие обозначения:

— параграфы, обязательные для всех учащихся;

— параграфы для тех, кто изучает физику более подробно;

Интересно — дополнительные сведения;

Важно — фрагменты текста, на которые надо обратить более пристальное внимание;

Запомни — определения и формулировки, которые необходимо запомнить;

— обсудить в классе или с товарищем некоторые утверждения, привести собственные примеры или ответить на вопросы;

— провести простые опыты, обратить внимание на явления, наблюдаемые в повседневной жизни;

— темы докладов на дополнительных занятиях, которые могут быть проведены в виде «Круглых столов», интернет-конференций и т. п.;

— примерные темы проектной и исследовательской деятельности;

— образцы заданий ЕГЭ;

— вопросы к параграфу;

Найти — ключевые слова для поиска информации по теме параграфа.

В конце каждой главы предложен примерный план для составления конспекта изученного материала. Эти конспекты помогут вам подготовиться к экзаменам.

При работе с учебником можно использовать электронное приложение. Оно содержит подробные биографии учёных, примеры решения задач, рисунки, фотографии, тесты, анимации, опыты и т. д. Работа с электронным приложением также поможет вам глубже понять изучаемый материал. Искать нужную тему или определение следует по каталогу. В данном учебнике используются следующие обозначения, взятые из него:

 — биографии учёных;

 — анимации;

 — видеофильмы, в которых показаны опыты;

 — тесты;

 — периодическая таблица элементов Д. И. Менделеева;

 — примеры решения задач.

Желаем вам испытать радость от познания окружающего мира, понимания основных законов его развития, осознания себя и своего места в нём!

ВВЕДЕНИЕ

ФИЗИКА И ПОЗНАНИЕ МИРА

С самого рождения мы привыкаем к вещам и явлениям, окружающим нас. Так, мы узнаём, что предмет всегда падает вниз, что есть твёрдые предметы, о которые можно удариться, что огонь может обжечь и т. д.

Однако как ни важны подобные знания, они ещё не образуют науку.

Человек всегда задаёт вопросы: почему что-то происходит? В чём причина наблюдаемого явления? Поиск ответов на эти вопросы и есть предмет научной деятельности.

Физика и другие науки. Именно развитие наук о природе дало в руки человека современную технику и привело к преобразованию окружающего нас мира. Основную роль сыграла физика — важнейшая наука, изучающая самые глубокие законы природы. Физика составляет фундамент главнейших направлений техники. Так, открытие транзистора, сделанное в лаборатории физики твёрдого тела, определило современное развитие электроники, радиотехники и вычислительной техники. Создание лазера позволило осуществить связь на большие расстояния, получить высококачественные объёмные изображения (голография), предложить один из способов удержания высокотемпературной плазмы, создать уникальные технологии операций на глазах и многое другое.

Открывая законы природы, спрятанные под покровом бесконечно многообразного мира явлений, человек научился применять их для своих целей, создавать устройства, без которых немыслима современная комфортная жизнь. Учёные продолжают исследования Вселенной, создают уникальные материалы, ведут поиск новых источников энергии.

Важно Физика — это наука, занимающаяся изучением основополагающих и вместе с тем наиболее общих свойств окружающего нас материального мира.

Поэтому понятия физики и её законы лежат в основе естествознания.

Физика очень тесно связана с астрономией, геологией, химией, биологией и другими естественными науками. Например, открытие двойной спирали ДНК, «главной молекулы», было сделано в физической лаборатории. Это открытие определило пути развития молекулярной биологии, призванной ответить на вопрос, что такое жизнь. Квантовая теория позволила химикам объяснить химическое строение вещества, законы распространения звука помогают геологам изучать земные недра.

Физика способствовала развитию многих областей математики. Английский физик Дж. Максвелл говорил: «Точные науки стремятся к тому, чтобы свести загадки природы к определению некоторых величин путём операций с числами». Английский учёный И. Ньютон создал дифференциальное и интегральное исчисления, пытаясь написать уравнения движения тел. Стремление к простоте математического описания позволило австрийскому физику Э. Шредингеру записать уравнение, которое описывает мир атомов.

Физическими методами исследования пользуются учёные практически всех областей науки.

Научный метод. Какими же путями добывается научная истина? Несколько сотен лет назад были выработаны основы физического метода исследования. Он состоит в следующем: опираясь на опыт, делая предположения о сути того или иного явления, отыскивают сначала качественные, а затем количественные (формулируемые математически) законы природы; открытые законы проверяются практикой. Таким образом, схема научного познания выглядит так:

Запомни наблюдение — гипотеза — теория — эксперимент.

Важно Именно эксперимент является критерием правильности теории.

«К физике относится только то, что может быть измерено» — это высказывание принадлежит американскому физику П. Бриджмену (1882—1961) и точно отражает особенность физики. Главным судьёй, который призван утвердить или отбросить данную теорию, является эксперимент. Физика имеет дело с воспроизводимыми ситуациями. Повторяя эксперимент при различных условиях, мы можем оценить влияние этих условий на данное физическое явление.

Модели в физике. Одним из мощных методов исследования в физике является метод моделирования.

Запомни **Моделирование** — это процесс замены реального объекта, процесса или явления другим, называемым **моделью**.
Модель — это идеализация реального объекта или явления при сохранении основных свойств, определяющих данный объект или явление.

Подчеркнём, что модель должна сохранять те свойства реального объекта, которые определяют его поведение. Модели бывают теоретическими и лабораторными, в последнее время широко используются компьютерные модели.

При создании теоретической модели используются результаты наблюдений и экспериментов. Очевидно, что проблема становится более понятной с помощью конкретных образов, именно поэтому модель чаще всего бывает механической. Например, движение молекул газа наглядно можно представить как движение упругих шариков, строение атома сначала предполагалось аналогичным строению Солнечной системы.

Одна из первых моделей, которой мы будем пользоваться, — это материальная точка, т. е. тело, размерами и формой которого можно пренебречь *в условиях данной задачи*. Последние слова являются ключевыми: именно условия конкретной задачи позволяют применить данную модель.

Сначала, когда данных мало, модель, как правило, получается грубой, но по мере накопления экспериментальных фактов она уточняется, однако для ответов на некоторые важные вопросы можно остановиться и на примитивной модели.

В лаборатории моделируются, как правило, явления, изучение которых в природных условиях представляет значительные трудности. Например, течение реки, изменение её русла моделируются в гидравлических лотках, испытание моделей самолётов проводится в аэродинамической трубе. При этом должны выполняться разные условия подобия — геометрическое, кинематическое и т. д.

Теоретическое решение любой физической задачи сводится к математическому моделированию, т. е. написанию уравнений. Часто эти уравнения получаются достаточно сложными, и их решения делаются с помощью компьютеров.

Научные гипотезы.

Запомни **Научная гипотеза** — высказанное суждение, недоказанное утверждение, предположение, объясняющие наблюдаемые явления или результаты лабораторных экспериментов.

Научная гипотеза всегда выдвигается для решения конкретной проблемы, чтобы объяснить полученные экспериментальные данные или устранить разногласия между теоретическими и экспериментальными результатами, полученными в ходе проверки ранее выдвинутых гипотез. Например, немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой теории, М. Планк, разрабатывая квантовую гипотезу, опирался как на выводы, полученные в рамках классической теории излучения, так и на отрицательные результаты проверки предыдущих гипотез.

Слова русского учёного Д. И. Менделеева подтверждают важность научных гипотез в процессе научного познания: «Они (*гипотезы*. — Авт.) науке и особенно её изучению необходимы. Они дают стройность и простоту, каких без их допущения достичь трудно. Вся история наук это показывает. А потому можно смело сказать: лучше держаться такой гипотезы, которая может оказаться со временем неверною, чем никакой. Гипотезы облегчают и делают правильною научную работу — отыскание истины, как плуг земледельца облегчает выращивание полезных растений».

Физические величины и их измерение. Для того чтобы понять и описать эксперименты, учёные вводят целый ряд физических величин, таких, как скорость, сила, давление, температура, электрический заряд и многие другие. Каждой величине надо дать точное определение, ввести её наименование в определённой системе единиц, указать, как эту величину можно измерить, как провести необходимый для такого измерения опыт.

Чаще всего в определениях физических величин просто уточняют и придают количественную форму тому, что непосредственно воспринимается нашими органами чувств. Так вводят понятия силы, температуры и т. д. Есть, конечно, величины, которые не воспринимаются непосредственно нашими органами чувств (например, электрический заряд). Но они выражаются через другие величины, на которые органы чувств человека реагируют. Так, электрический заряд определяется по силам взаимодействия между заряженными телами.

Для измерения физической величины необходим эталон, стандарт, т. е. некоторое средство измерения, позволяющее хранить единицу, передавать и повторять её размер. Эталоны, такие, например, как эталоны метра, килограмма и многих других величин, хранятся в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция). Точные копии эталона разосланы в разные лаборатории мира.

А существует ли вообще точное значение физической величины? Мы знаем, что любое тело состоит из атомов. При увеличении точности измерения мы приходим к необходимости измерения объектов очень малых размеров, таких, как атомы и молекулы. Одним из существенных выводов квантовой механики был вывод о том, что бессмысленно даже ставить вопрос о точном значении физической величины, причём неопределённость лежит в основе самих законов природы, а не в несовершенстве приборов.

Теория. Изучая количественные связи между отдельными величинами, можно выявить частные закономерности. На основе таких закономерностей развивают теорию явлений. Теория должна объяснять частные закономерности с общей точки зрения. Теория позволяет не только объяснять уже наблюдавшиеся явления, но и предсказывать новые. Так, например Д. И. Менделеев на основе открытого им периодического закона предсказал существование нескольких химических элементов, которые в то время не были известны, а английский физик Дж. Максвелл предсказал существование электромагнитных волн.

Если между теорией и экспериментом появляется несоответствие, то теорию надо изменить, чтобы можно было объяснить все новые полученные данные, т. е. теорию надо усовершенствовать. Практически всякая известная теория является результатом последовательных уточнений.

Физический закон. Чтобы из наблюдений за физическими явлениями сделать общие выводы, найти причины этих явлений, следует установить количественные зависимости между различными физическими величинами. Проводя физический эксперимент, стремятся проследить зависимость данной величины от характера изменения каждого из условий в отдельности, Например, давление газа зависит от его массы, объёма и температуры. Чтобы исследовать эту зависимость, надо сначала изучить, как влияет на давление изменение объёма, когда температура и масса остаются неизменными. Затем нужно проследить, как давление зависит от температуры при постоянном объёме, и т. д. Таким образом, в процессе исследований учёные получают *научные факты*.

Запомни **Научными фактами** называют утверждения, которые можно всегда проверить и подтвердить при выполнении заданных условий.

Важно **Физический закон** — основанная на научных фактах устойчивая связь между повторяющимися явлениями, процессами и состояниями тел и других материальных объектов в окружающем мире.

Физические законы обычно выражаются в виде короткого словесного утверждения или компактной математической формулы, связывающей между собой определённые физические величины. Английский физик-теоретик П. Дирак сказал: «Физический закон должен обладать математической красотой».

Границы применимости физических законов. Теория, проверенная и подтверждённая многочисленными экспериментами, может рассматриваться как *физический закон*. Однако у каждого закона есть границы применимости. Эти границы прежде всего определяются той теоретической моделью, в рамках которой мы рассматриваем данный закон. Все законы, которым подчиняется реальный газ, выведенные на основе модели идеального газа, справедливы только для тех условий, при которых свойства реального газа приближены к свойствам идеального газа.

Так, мы уже знаем закон Ома: сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка: $I = \frac{U}{R}$. Однако этот закон справедлив не для всех проводников. Например, он неприменим для ионизованного газа. Кроме того, им можно пользоваться только в определённом интервале значений силы тока, в котором можно считать сопротивление постоянным. На самом деле при прохождении тока проводник нагревается, сопротивление проводника увеличивается, и сила тока будет отличаться от расчётной.

Открытия в физике. Физика продолжает бурно развиваться. Каждый новый эксперимент позволяет усовершенствовать теорию. Между теорией и экспериментом существует неразрывная связь, непрерывное взаимодействие.

Необходимо помнить, что любая физическая теория основывается на определённой модели объектов и явлений. В процессе добывания новых научных фактов любая физическая модель совершенствуется и усложняется. Однако очевидно, что окружающий нас мир гораздо сложнее, многообразней и совершенней любой самой сложной, созданной человеческим умом модели. Поэтому завершённость какой-либо физической теории отнюдь не означает полного познания законов природы.

В настоящее время учёные получают в лабораториях новые материалы и исследуют их свойства. Так, в 2010 году была присуждена Нобелевская премия по физике А. Гейму и К. Новосёлову за открытие графена, который обладает сверхпрочными свойствами и наибольшей электропроводностью из существующих материалов. Учёные решают глобальные вопросы: открытие новых элементарных частиц, новых физических законов, новых видов энергии. Разрабатывают теории, подтверждение которых требует создания очень сложных установок, таких, как, например, Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе. Длина его основного кольца около 27 км. Создание таких установок требует огромных затрат и сложной подготовки.

Однако часто случается так, что теории долго не находят экспериментального подтверждения. Так, например, ещё не обнаружены кварки, хотя считается, что все элементарные частицы состоят из них, и создана стройная теория кварков. Так что сегодня нет никаких оснований считать, что раскрыты почти все законы природы и мы находимся у границ познания. Поле для деятельности будущих учёных практически не имеет границ.

Физика. Законы природы. Теория. Эксперимент. Научный факт Найти

«Что мы знаем о физике»

1. Известные нам физические величины.
2. Физические явления — примеры и попытки объяснения.
3. Физические модели. Компьютерное моделирование физических явлений.
4. Использование моделей в других науках, например в биологии, химии и географии.
5. Истории открытий некоторых физических законов.

МЕХАНИКА

Запомни **Механика** — это наука о причинах и общих законах механического движения тел.

Законы механики были сформулированы великим английским учёным И. Ньютоном. На могильной плите в Вестминстерском аббатстве в Лондоне высечены знаменательные слова:

И. Ньютон
(1642—1727)

Здесь покоится
Сэр Исаак Ньютон,
Который почти божественной силой своего ума
Впервые объяснил
С помощью своего математического метода
Движения и формы планет,
Пути комет, приливы и отливы океана.
Он первый исследовал разнообразие световых лучей
И проистекающие отсюда особенности цветов,
Которых до того времени никто даже не подозревал.
Прилежный, проницательный и верный истолкователь
Природы, древностей и Священного Писания.
Он прославил в своём учении всемогущего Творца.
Требуемую Евангелием простоту он доказал своей жизнью.
Пусть смертные радуются, что в их среде
Жило такое украшение человеческого рода.
Родился 25 декабря 1642 г.
Умер 20 марта 1727 г.

На протяжении многих лет учёные были уверены, что единственными основными (фундаментальными) законами природы являются законы механики Ньютона. Однако оказалось, что не все явления можно объяснить на основе механической картины мира, например у электромагнитных явлений иная физическая природа, и они не подчиняются законам Ньютона.

Было выяснено также, что законы Ньютона, как и любые другие законы природы, не являются абсолютно точными. При движениях со скоростями, близкими к скорости света, тела обнаруживают свойства, о существовании которых Ньютон не подозревал.

Механика изучает движение тел. В физике пользуются абстрактным понятием «физическое тело» или просто «тело». Под телом мы понимаем любой объект, это может быть бегущая собака, человек, автомобиль, Земля, обращающаяся вокруг Солнца, и т. д. Изучив законы движения физического тела, мы можем ответить на практические вопросы, например, о скорости движения поезда, ракеты, человека и т. д.

Движение окружающих нас тел можно объяснить на основе законов Ньютона, область применения которых очень обширна.

Запомни Механика, основанная на законах Ньютона, называется **классической механикой**.

КИНЕМАТИКА

ГЛАВА 1 КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЁРДОГО ТЕЛА

По характеру решаемых задач механику делят на *кинематику* и *динамику*.

В кинематике описывают движение тел без выяснения причин, вызывающих данное движение.

§ 1 МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

Вспомните, по каким признакам мы определяем, что тело движется.
Как вы указываете место, в котором собираетесь встретиться с другом?

Первое, что бросается в глаза при наблюдении окружающего нас мира, — это его изменчивость. Мир не является застывшим, статичным. Изменения в нём весьма разнообразны. Но если спросить вас, какие изменения вы замечаете чаще всего, то ответ, пожалуй, будет однозначным: *изменяется положение предметов* (или тел, как говорят физики) *относительно земли и относительно друг друга с течением времени.*

Понаблюдайте за движением различных тел и попробуйте дать своё определение механического движения.

Бежит ли собака, или мчится автомобиль — с ними происходит один и тот же процесс: их положение относительно земли и относительно вас изменяется с течением времени. Они перемещаются. Сжимается пружина, прогибается доска, на которую вы сели, — изменяется положение различных частей тела относительно друг друга.

Запомни Изменение положения тела или частей тела в пространстве относительно других тел с течением времени называется **механическим движением**.

Определение механического движения выглядит просто, но простота эта обманчива. Прочтите определение ещё раз и подумайте, все ли слова вам ясны: *пространство, время, относительно других тел.* Скорее всего, эти слова требуют пояснения.

Пространство и время. Пространство и время — наиболее общие понятия физики и... наименее ясные.

Исчерпывающих сведений о пространстве и времени мы не имеем. Но и те результаты, которые получены сегодня, изложить в самом начале изучения физики невозможно.

Обычно нам вполне достаточно уметь измерять расстояние между двумя точками пространства с помощью линейки и интервалы времени с помощью часов. Линейка и часы — важнейшие приспособления для измерений в механике, да и в быту. С расстояниями и интервалами времени приходится иметь дело при изучении многих явлений во всех областях науки.

Интересно Согласно И. Ньютону «пространство — вместилище вещей, а время — вместилище событий».

Приведите примеры тел, относительно которых здание вашей школы движется с большой скоростью, и тел, относительно которых пассажиры летящего самолёта неподвижны.

«...Относительно других тел». Если эта часть определения механического движения ускользнула от вашего внимания, то вы рискуете не понять самого главного. Например, в купе вагона на столике лежит яблоко. Во время отправления поезда двух наблюдателей (пассажира и провожающего) просят ответить на вопрос: яблоко движется или нет?

Каждый наблюдатель оценивает положение яблока по отношению к себе. Пассажир видит, что яблоко находится на расстоянии 1 м от него и это расстояние сохраняется с течением времени. Провожающий на перроне видит, как с течением времени расстояние от него до яблока увеличивается.

Пассажир отвечает, что яблоко не совершает механического движения — оно неподвижно; провожающий говорит, что яблоко движется.

Сформулируем *закон относительности движения.*

Закон относительности движения Характер движения тела зависит от того, относительно каких тел мы рассматриваем данное движение.

Приступим к изучению механического движения. Человечеству понадобилось около двух тысяч лет, чтобы встать на верный путь, который завершился открытием законов механического движения.

Интересно Попытки древних философов объяснить причины движения, в том числе и механического, были плодом чистой фантазии. Подобно тому, рассуждали они, как утомлённый путник ускоряет шаги по мере приближения к дому, падающий камень начинает двигаться всё быстрее и быстрее, приближаясь к матери-земле. Движения живых организмов, например кошки, казались в те времена гораздо более простыми и понятными, чем падение камня. Были, правда, и гениальные озарения. Так, греческий философ Анаксагор говорил, что Луна, если бы не двигалась, упала бы на Землю, как падает камень из пращи.

Однако подлинное развитие науки о механическом движении началось с трудов великого итальянского физика Г. Галилея.

Запомни **Кинематика** — это раздел механики, изучающий способы описания движений и связь между величинами, характеризующими эти движения.

Описать движение тела — это значит указать способ определения его положения в пространстве в любой момент времени.

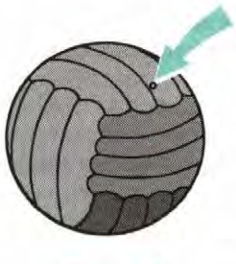


Рис. 1.1

Уже на первый взгляд задача описания кажется очень сложной. В самом деле, взгляните на клубящиеся облака, колышущиеся листья на ветке дерева. Представьте себе, какое сложное движение совершают поршни автомобиля, мчащегося по шоссе. Как же приступить к описанию движения? Самое простое (а в физике всегда идут от простого к сложному) — это научиться описывать движение точки. Под точкой можно понимать, например, маленькую отметку, нанесённую на движущийся предмет — футбольный мяч (рис. 1.1), колесо трактора и т. д. Если мы будем знать, как происходит движение каждой такой точки (каждого очень маленького участка) тела, то мы будем знать, как движется всё тело.

Однако когда вы говорите, что пробежали на лыжах 10 км, то никто не станет уточнять, какая именно часть вашего тела преодолела расстояние в 10 км, хотя вы отнюдь не точка. В данном случае это не имеет сколько-нибудь существенного значения.

Введём понятие материальной точки — первой физической модели реальных тел.

Запомни **Материальная точка** — тело, размерами и формой которого можно пренебречь в условиях рассматриваемой задачи.

Система отсчёта. Движение любого тела, как мы уже знаем, есть движение относительное. Это значит, что движение данного тела может быть различным по отношению к другим телам. Изучая движение интересующего нас тела, мы обязательно должны указать, относительно какого тела это движение рассматривается.

Какие слова вам кажутся наиболее важными в определении материальной точки? Приведите товарищу по парте примеры ситуаций, в которых реальные объекты можно считать материальными точками. Рассмотрите ситуации, в которых для этих объектов модель материальной точки применить нельзя.

Запомни Тело, относительно которого рассматривается движение, называется **телом отсчёта**.

Чтобы рассчитать положение точки (тела) относительно выбранного тела отсчёта в зависимости от времени, надо не только связать с ним систему координат, но и суметь измерить время. Время измеряют с помощью часов. Современные часы — это сложные устройства. Они позволяют измерять время в секундах с точностью до тринадцатого знака после запятой. Естественно, ни одни механические часы такой точности обеспечить не могут. Так, одни из самых точных в стране механических часов на Спасской башне Кремля в десять тысяч раз менее точны, чем Государственный эталон времени. Если эталонные часы не корректировать, то на одну секунду они убегут или отстанут за триста тысяч лет. Понятно, что в быту нет необходимости измерять время с очень большой точностью. Но для физических исследований, космонавтики, геодезии, радиоастрономии, управления воздушным транспортом высокая точность в измерении времени просто необходима. От точности измерения времени зависит точность, с которой мы сумеем рассчитать положение тела в какой-либо момент времени.

Запомни Совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов называют **системой отсчёта**.

Систему отсчёта выбирают таким образом, чтобы движение тела в ней было наиболее простым и в то же время можно было ответить на поставленный в задаче вопрос.

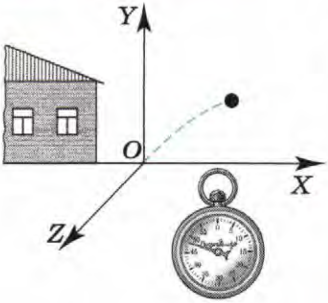


Рис. 1.2

На рисунке 1.2 показана система отсчёта, выбранная для рассмотрения полёта брошенного мяча. В данном случае телом отсчёта является дом, оси координат выбраны так, что мяч летит в плоскости XOY, для определения времени берётся секундомер.

В какой системе отсчёта лучше рассматривать движение: космонавта на Луне; автомобиля, догоняющего впереди движущийся автобус; мяча, упавшего в воду из движущейся по реке лодки?

Кинематика. Механическое движение. Система отсчёта Найти

1. Что называется телом отсчёта?
2. Что составляет систему отсчёта?
3. Какие способы отсчёта времени вам известны?

A1. Истинность теории базируется на
А) достоверности экспериментов, лежащих в её основе
Б) экспериментальном подтверждении выводов из неё
1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

A2. Исследуется перемещение слона и мухи. Модель материальной точки может использоваться для описания движения
1) только слона
2) только мухи
3) и слона, и мухи в разных исследованиях
4) ни слона, ни мухи, поскольку это живые существа

A3. Решаются две задачи:
А. Рассчитывается манёвр стыковки двух космических кораблей.
Б. Рассчитываются периоды обращения космических кораблей вокруг Земли.
В каком случае космические корабли можно рассматривать как материальные точки?
1) только в первом
2) только во втором
3) в обоих случаях
4) ни в первом, ни во втором

A4. Когда мы говорим, что смена дня и ночи на Земле объясняется восходом и заходом Солнца, то мы имеем в виду систему отсчёта, связанную с
1) Солнцем
2) Землёй
3) планетами
4) любым телом

A5. Чтобы было проще рассчитать время движения автобуса между двумя остановками, надо в качестве тела отсчёта выбрать
1) автобус
2) проезжающую мимо машину
3) шоссе, по которому он движется
4) идущего по тротуару пешехода

§ 2 СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Вспомните из курса физики основной школы физические величины, которыми можно описать механическое движение тела.

Если тело можно считать точкой, то для описания его движения нужно научиться рассчитывать положение точки в любой момент времени относительно выбранного тела отсчёта.

Существует несколько способов описания, или, что одно и то же, задания движения точки. Рассмотрим два из них, которые наиболее часто применяются.

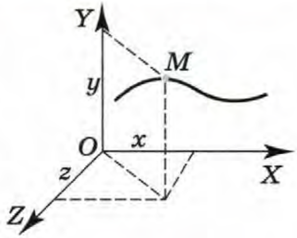


Рис. 1.3

Координатный способ. Будем задавать положение точки с помощью координат (рис. 1.3). Если точка движется, то её координаты изменяются с течением времени. Так как координаты точки зависят от времени, то можно сказать, что они являются функциями времени.

Математически это принято записывать в виде

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t). \end{cases} \qquad (1.1)$$

Сколько координат необходимо для описания движения: машины по прямой дороге; бильярдного шара по столу; мухи по комнате?

Запомни Уравнения (1.1) называют **кинематическими уравнениями движения** точки, записанными в координатной форме.

Если уравнения движения известны, то для каждого момента времени мы сможем рассчитать координаты точки, а следовательно, и её положение относительно выбранного тела отсчёта. Вид уравнений (1.1) для каждого конкретного движения будет вполне определённым.

Важно Основной задачей кинематики является определение уравнений движения тел.

Количество выбираемых для описания движения координат зависит от условий задачи. Если движение точки происходит вдоль прямой, то достаточно одной координаты и, следовательно, одного уравнения, например, $x(t)$. Если движение происходит на плоскости, то его можно описать двумя уравнениями — $x(t)$ и $y(t)$. Уравнения (1.1) описывают движение точки в пространстве.

Векторный способ. Положение точки можно задать, и с помощью радиус-вектора.

Запомни **Радиус-вектор** — это направленный отрезок, проведённый из начала координат в данную точку.

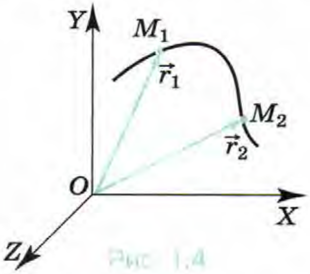


Рис. 1.4

При движении материальной точки радиус-вектор, определяющий её положение, с течением времени изменяется (поворачивается и меняет длину; рис. 1.4), т. е. является функцией времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \qquad (1.2)$$

На рисунке 1.4 радиус-вектор $\vec{r_1}$ определяет положение точки в момент времени t_1, а радиус-вектор $\vec{r_2}$ — в момент времени t_2.

Запомни Формула (1.2) есть **уравнение движения** точки, записанное в векторной форме.

Если оно известно, то мы можем для любого момента времени рассчитать радиус-вектор точки, а значит, определить её положение.

Важно Таким образом, задание трёх скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

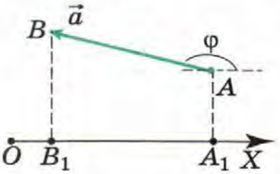


Рис. 1.5

Итак, мы знаем, что положение точки в пространстве определяется её координатами или её радиус-вектором.

Модуль и направление любого вектора находят по его проекциям на оси координат. Чтобы понять, как это делается, вначале необходимо ответить на вопрос: что понимают под проекцией вектора на ось?

Изобразим какую-либо ось (рис. 1.5), например ось OX. Опустим из начала A и конца B вектора $\vec{a}$ перпендикуляры на ось OX. Точки A_1 и B_1 есть проекции соответственно начала и конца вектора $\vec{a}$ на эту ось.

Запомни **Проекцией вектора $\vec{a}$ на какую-либо ось** называется длина отрезка A_1B_1 между проекциями начала и конца вектора на эту ось, взятая со знаком «+» или «—».

В каких случаях проекция вектора на ось максимальна, а в каких — минимальна? Можно ли расположить на плоскости вектор так, чтобы и проекция на ось X, и проекция на ось Y имели максимальные значения?

Проекцию вектора мы будем обозначать той же буквой, что и вектор, но, во-первых, без стрелки над ней и, во-вторых, с индексом внизу, указывающим, на какую ось проецируется вектор. Так, a_x и a_y — проекции вектора $\vec{a}$ на оси координат OX и OY.

Согласно определению проекции вектора на ось можно записать:

$$a_x = \pm\, |A_1B_1|\,.$$

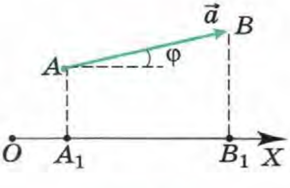


Рис. 1.6

Проекция вектора на ось представляет собой алгебраическую величину. Она выражается в тех же единицах, что и модуль вектора.

Условимся считать проекцию вектора на ось положительной, если от проекции начала вектора к проекции его конца надо идти в положительном направлении оси проекций (рис. 1.6). В противном случае (см. рис. 1.5) она считается отрицательной.

Из рисунков 1.5 и 1.6 нетрудно увидеть, что проекция вектора на ось будет положительной, когда вектор составляет острый угол φ с направлением оси проекций, и отрицательной, когда вектор составляет с направлением оси проекций тупой угол φ.

Интересно

Иногда нужно находить составляющие вектора, например векторы $\vec{a}_x$ и $\vec{a}_y$. Сумма составляющих равна вектору $\vec{a}$: $\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$.

Уравнения движения. Радиус-вектор. Проекция вектора Найти

1. Какими способами можно задать положение точки?
2. Как задают положение точки в пространстве с помощью координат?
3. Что называется радиус-вектором?
4. Что называется проекцией вектора на ось?
5. Чему равна проекция вектора на ось, если вектор направлен так же, как и ось проекции?
6. Чему равна проекция вектора на ось, если вектор направлен противоположно оси проекции?
7. Чему равна проекция вектора на перпендикулярную к нему ось?

А1. Точка движется в плоскости XOY. Вектор $\vec{r}$, модуль которого равен 1 м, направлен под углом 30° к оси X. Чему равны проекции вектора $\vec{r}$ на оси X и Y?
1) 0,5; 0,87 2) 0,5; 0 3) 0,87; 0,5 4) 0,87; 0

А2. Точка движется в плоскости XOY. Вектор $\vec{r}$, модуль которого равен 2 м, направлен под углом 135° к оси X. Чему равны проекции вектора $\vec{r}$ на оси X и Y?
1) 1,41; 1,41 2) 0,71; 0 3) −1,41; −0,71 4) −1,41; 1,41 м

А3. Начальное положение точки $\vec{r}(3;\ 0)$. Чему равен модуль вектора, определяющего новое положение точки, если изменение координаты y равно 4?
1) 7 м 2) 5 м 3) 4 м 4) 1 м

А4. Начальное положение точки $\vec{r}_0(4;\ 0;\ 0)$. Через промежуток времени t положение точки $\vec{r}(4;\ 0;\ 3)$. Кинематические уравнения движения имеют вид

1)	2)	3)	4)
$x = 4$ м	$x = 4$ м	$x = 4$ м	$x = 4$ м
$y = 0$	$y = y(t)$	$y = 0$	$y = 0$
$z = 5$ м	$z = 3$ м	$z = 3$ м	$z = z(t)$

А5. Точка движется по прямой в плоскости XOY. Начальное положение точки $\vec{r}_0(3;\ 0)$, конечное $\vec{r}_0(0;\ 3)$. Угол φ к оси OX, под которым двигалась точка, равен
1) 0° 2) 45° 3) 135° 4) 90°

§ 3 ТРАЕКТОРИЯ. ПУТЬ. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

С какими векторными величинами вы встречались на уроках физики? Чем отличаются векторные величины от скалярных?

Запомни Линия, по которой движется точка в пространстве, называется **траекторией**.

В зависимости от формы траектории все движения точки делятся на прямолинейные и криволинейные.

Запомни Если траекторией является прямая линия, движение точки называется **прямолинейным**, а если кривая — **криволинейным**.

С верхней полки вагона поезда, движущегося прямолинейно, уронили предмет. Можно ли считать движение предмета прямолинейным в системе отсчёта, связанной с вагоном? в системе отсчёта, связанной с землёй?

Пусть в какой-то момент времени движущаяся точка занимает положение M_1 (рис. 1.7, *а*). Как найти её положение спустя некоторый промежуток времени после этого момента?

Допустим, известно, что точка находится на расстоянии l относительно своего начального положения. Сможем ли мы в этом случае однозначно определить новое положение точки? Очевидно, нет, поскольку есть бесчисленное множество точек, которые удалены от точки M_1 на расстояние l. Чтобы однозначно определить новое положение точки, надо ещё знать, в каком направлении от точки M_1 следует отложить отрезок длиной l.

Таким образом, если известно положение точки в какой-то момент времени, то найти её новое положение можно с помощью определённого вектора (рис. 1.7, *б*).

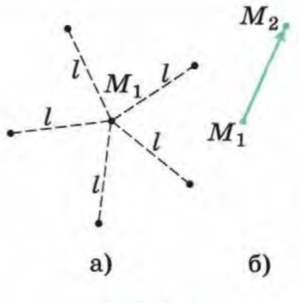


Рис. 1.7

Запомни Вектор, проведённый из начального положения точки в её конечное положение, называется **вектором перемещения** или просто **перемещением точки**.

Поскольку перемещение — величина векторная, то перемещение, показанное на рисунке 1.7, *б*, можно обозначить $\overrightarrow{M_1M_2}$.

Покажем, что при векторном способе задания движения перемещение можно рассматривать как изменение радиус-вектора движущейся точки.

Пусть радиус-вектор $\vec{r}_1$ задаёт положение точки в момент времени t_1, а радиус-вектор $\vec{r}_2$ — в момент времени t_2 (рис. 1.8). Чтобы найти изменение радиус-вектора за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, надо из конечного вектора $\vec{r}_2$ вычесть начальный

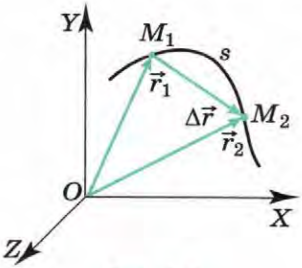


Рис. 1.8

вектор $\vec{r_1}$. Из рисунка 1.8 видно, что перемещение, совершённое точкой за промежуток времени Δt, есть изменение её радиус-вектора за это время. Следовательно, обозначив изменение радиус-вектора через $\Delta\vec{r}$, можно записать: $\Delta\vec{r} = \vec{r_1} - \vec{r_2}$.

Понаблюдайте за движением различных тел и классифицируйте виды их движения.

Запомни **Путь** s — длина траектории при перемещении точки из положения M_1 в положение M_2.

Важно Модуль перемещения может быть не равен пути, пройденному точкой.

Например, на рисунке 1.8 длина линии, соединяющей точки M_1 и M_2, больше модуля перемещения: $s > |\Delta\vec{r}|$. Путь равен перемещению только в случае прямолинейного однонаправленного движения.

Какая из характеристик движения — путь или перемещение — вам кажется наиболее важной? В каких случаях следует определять путь, а в каких — перемещение?

Перемещение тела $\Delta\vec{r}$ — вектор, путь s — скаляр, $|\Delta\vec{r}| \leqslant s$.

Траектория. Путь. Перемещение Найти

1. Что называется перемещением точки?
2. В каком случае модуль перемещения точки за какое-то время равен пути, пройденному ею за то же время?

А1. Вертолёт поднимается вертикально вверх. Какую форму имеет траектория движения точки на конце лопасти винта вертолёта в системе отсчёта, связанной с землёй?
1) точка
2) окружность
3) прямая
4) винтовая линия

А2. Два тела, брошенные с поверхности Земли вертикально вверх, достигли высот 10 м и 20 м и упали на Землю. Пути, пройденные этими телами, отличаются на
1) 5 м
2) 20 м
3) 10 м
4) 30 м

А3. Человек обошёл круглое озеро диаметром 1 км. О пути, пройденном человеком, и модуле его перемещения можно утверждать, что
1) путь равен 3,14 км, модуль перемещения равен 1 км
2) путь равен 3,14 км, модуль перемещения равен нулю
3) путь равен нулю, модуль перемещения равен нулю
4) путь равен нулю, модуль перемещения равен 3,14 км

А4. Точка начинает движение по окружности радиусом 2 м, и когда её перемещение равно по модулю диаметру, путь, пройденный ею, равен
1) 2 м
2) 4 м
3) 6,28 м
4) 12,56 м

§ 4 РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СКОРОСТЬ. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ

Один и тот же путь тело может пройти за разные промежутки времени. Какая физическая величина характеризует быстроту движений тела? Как, зная эту величину, определить положение тела?

На уроках физики вы довольно подробно изучали равномерное движение.

Запомни Движение точки называется **равномерным**, если она за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути.

Равномерное движение может быть как криволинейным, так и прямолинейным. Равномерное прямолинейное движение — самый простой вид движения. С него мы и начнём изучение движения в кинематике.

Скорость. Важной величиной, характеризующей движение точки, является её скорость. Некоторое представление о скорости каждый из нас имел и до начала изучения физики.

Черепаха перемещается с малой скоростью, человек движется с большей скоростью, автомобиль движется быстрее человека, а самолёт — ещё быстрее. Самой большой скорости относительно Земли человек достигает с помощью космических ракет.

Составьте с помощью Интернета таблицу примерных скоростей различных объектов. Проанализируйте её.

В механике рассматривают скорость как векторную величину. А это означает, что скорость можно считать известной (заданной) лишь в том случае, если известны её модуль и направление.

Дадим определение скорости равномерного прямолинейного движения точки. Пусть точка, двигаясь равномерно и прямолинейно в течение промежутка времени Δt, переходит из положения M_1 в положение M_2 (рис. 1.9), совершив при этом перемещение $\Delta\vec{r}$. Поделим перемещение $\Delta\vec{r}$ на промежуток времени Δt, в течение которого это перемещение произошло. В результате получим вектор.

(При делении вектора на число получаем вектор.) Этот вектор называют скоростью равномерного прямолинейного движения точки и обозначают буквой $\vec{v}$. Следовательно, можно записать:

$$\boxed{\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}}. \qquad (1.3)$$

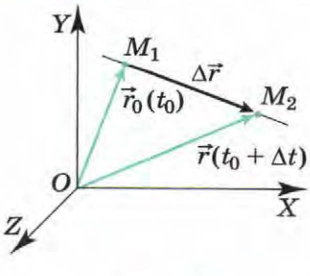


Рис. 1.9

Так как промежуток времени Δt — величина положительная, то скорость направлена так же, как и перемещение $\Delta\vec{r}$. Выясним смысл модуля скорости

$$v = \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}.$$

Запомни **Скоростью равномерного прямолинейного движения точки** называется векторная величина, равная отношению перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло.

Модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ есть расстояние, пройденное точкой за время Δt. А так как точка движется равномерно, то модуль отношения, а значит, и модуль скорости υ есть величина, численно равная пути, пройденному точкой за единицу времени.

Уравнение равномерного прямолинейного движения точки. Пусть радиус-вектор $\vec{r_0}$ задаёт положение точки в начальный момент времени t_0, а радиус-вектор $\vec{r}$ — в момент времени t. Тогда $\Delta t = t - t_0$, $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r_0}$, и выражение для скорости принимает вид $\vec{\upsilon}=\dfrac{\vec{r}-\vec{r_0}}{t-t_0}$.

Если начальный момент времени t_0 принять равным нулю, то

$$\vec{\upsilon}=\frac{\vec{r}-\vec{r_0}}{t}.$$

Отсюда

$$\boxed{\vec{r} = \vec{r_0} + \vec{\upsilon}t.} \qquad (1.4)$$

Проведите эксперимент. Измерьте время вашего перемещения из одной точки в другую, например от двери школы до калитки. Определите скорость. Сравните вашу скорость со скоростью товарища, прошедшего это же расстояние.

Последнее уравнение и есть уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанное в векторной форме. Оно позволяет найти радиус-вектор точки при этом движении в любой момент времени, если известны скорость точки и радиус-вектор, задающий её положение в начальный момент времени.

Вместо векторного уравнения (1.4) можно записать три эквивалентных ему уравнения в проекциях на оси координат.

Радиус-вектор $\vec{r}$ является суммой двух векторов: радиус-вектора $\vec{r_0}$ и вектора $\vec{\upsilon}t$. Следовательно, проекции радиус-вектора $\vec{r}$ на оси координат должны быть равны сумме проекций этих двух векторов на те же оси. Рассмотрим случай, когда направления $\vec{r_0}$ и $\vec{\upsilon}$ совпадают.

Выберем оси координат так, чтобы точка двигалась по какой-либо оси, например по оси OX. Тогда векторы $\vec{r_0}$ и $\vec{\upsilon}$ будут составлять с осями OY и OZ прямой угол. Поэтому их проекции на эти оси равны нулю. А значит, равны нулю в любой момент времени и проекции радиус-вектора $\vec{r_0}$ на оси OY и OZ. Так как проекции радиус-вектора на координатные оси равны координатам его конца, то $r_x = x$ и $r_{0x} = x_0$. Поэтому в проекциях на ось OX уравнение (1.4) можно записать в виде

Запишите уравнение (1.4) в проекциях на оси декартовой системы координат. Обсудите, в каком случае при рассмотрении движения точки можно ограничиться одной осью.

$$\boxed{x = x_0 + \upsilon_x t.} \qquad (1.5)$$

Запомни Уравнение (1.5) есть **уравнение равномерного прямолинейного движения точки**, записанное в координатной форме.

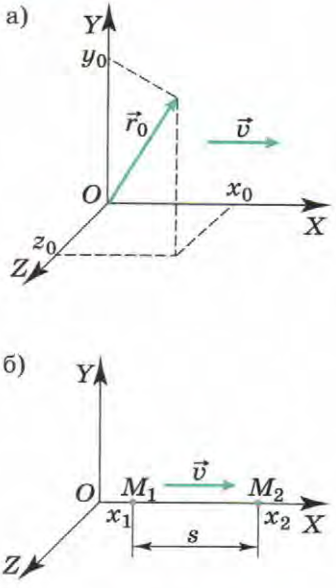


Рис. 1.10

Оно позволяет найти координату x точки при этом движении в любой момент времени, если известны проекция её скорости на ось OX и её начальная координата x_0.

Если $\vec{r}_0$ и $\vec{v}$ не совпадают по направлению, а ось OX направлена вдоль скорости, то уравнение движения запишем в виде

$$x = x_0 + v_x t$$
$$y = y_0$$
$$z = z_0,$$

где x_0, y_0, z_0 — проекции радиус-вектора $\vec{r}_0$ на оси координат (рис. 1.10, *а*).

Путь s, пройденный точкой при движении вдоль оси OX (рис. 1.10, *б*), равен модулю изменения её координаты: $s = |x_2 - x_1|$. Его можно найти, зная модуль скорости $v = |v_x|$:

$$\boxed{s = |v_x|t = vt.} \qquad (1.6)$$

Движение точки может происходить как по направлению оси OX ($v_x = v$), так и в противоположную сторону ($v_x = -v$). Поэтому при расчётах разумно пользоваться уравнением: $x = x_0 \pm vt$.

Какое из наблюдаемых вами движений можно приблизительно считать равномерным?

Отметим, что, строго говоря, равномерного прямолинейного движения не существует. Автомобиль на шоссе никогда не едет абсолютно прямо, небольшие отклонения в ту или иную сторону от прямой всегда имеются. И значение скорости слегка изменяется. Но приближённо на протяжении не слишком большого промежутка времени движение автомобиля можно считать равномерным и прямолинейным с достаточной для практических целей точностью. Таково одно из упрощений действительности, позволяющее без больших усилий описывать многие движения.

Графическое представление равномерного прямолинейного движения. Полученные результаты можно изобразить наглядно с помощью графиков. Особенно прост график зависимости проекции скорости от времени (рис. 1.11). Это прямая, параллельная оси времени. Площадь прямоугольника $OABC$, заштрихованная на рисунке, равна изменению координаты точки за время t. Ведь сторона OA есть v_x, а сторона OC — время движения t, поэтому $\Delta x = v_x t$.

На рисунке 1.12 приведены примеры графиков зависимости координаты от времени для трёх различных случаев равномерного прямолинейного движения. Прямая *1* соответствует случаю $x_0 = 0$, $v_{x1} > 0$; прямая *2* — случаю $x_0 < 0$, $v_{x2} > 0$, а прямая *3* — случаю $x_0 > 0$, $v_{x3} < 0$. Угол наклона α_2 прямой *2* больше, чем угол наклона α_1 прямой *1*. За один и тот же промежуток времени t_1 точка, движущаяся со скоростью v_{x2}, проходит большее расстояние, чем при движении её со скоростью v_{x1}. Следовательно, скорость v_{x2} боль-

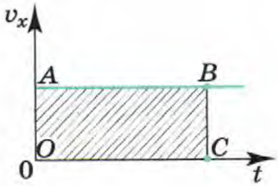


Рис. 1.11

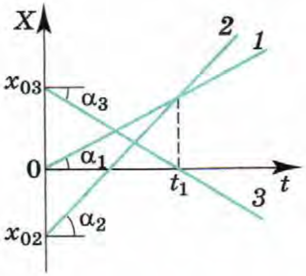


Рис. 1.12

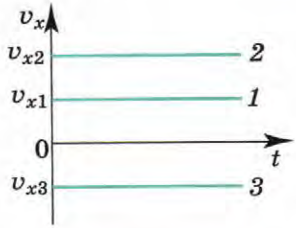


Рис. 1.13

ше, чем скорость v_{x1}. Проекция скорости определяет угол наклона прямой к оси t. Очевидно, проекция скорости v_x численно равна тангенсу угла α. В случае *3* $\alpha_3 < 0$, движение происходит в сторону, противоположную оси OX.

На рисунке 1.13 представлены зависимости проекций скоростей от времени для случаев *1*, *2* и *3*.

Равномерное прямолинейное движение. Скорость Найти

1. Как записывается в векторной форме уравнение равномерного прямолинейного движения точки?
2. Как записывается в координатной форме уравнение равномерного прямолинейного движения точки, если она движется: по оси OY? по оси OZ?
3. Равен ли модуль перемещения длине пути при равномерном движении точки?
4. Можно ли сказать, что тангенс угла наклона прямой $x(t)$ к оси t численно равен скорости?

А1. Зависимость координаты точки от времени при равномерном прямолинейном движении выражается

1) линейной функцией
2) квадратичной функцией
3) тригонометрической функцией
4) показательной функцией

А2. Координата точки изменяется с течением времени согласно формуле $x = 10 - 4t$. Чему равна координата этой точки через 5 с после начала движения?

1) −20 м
2) −10 м
3) 10 м
4) 30 м

А3. В таблице приведены координаты корабля, плывущего по прямому каналу.

x, м	0	1500	3000	4500	6000	7500	9000
t, мин	0	5	10	15	20	25	30

Согласно данным таблицы, движение корабля является

1) равномерным в течение всего времени наблюдения
2) неравномерным в течение всего времени наблюдения
3) равномерным первые 10 мин наблюдения и неравномерным с 10-й по 30-ю мин
4) неравномерным первые 10 мин наблюдения и равномерным с 10-й по 30-ю мин

§ 5 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ»

При решении задач по данной теме необходимо прежде всего выбрать тело отсчёта и связать с ним систему координат. В данном случае движение происходит по прямой, поэтому для его описания достаточна одна ось, например ось OX. Выбрав начало отсчёта, записываем уравнения движения.

Задача 1. Определите модуль и направление скорости точки, если при равномерном движении вдоль оси OX её координата за время $t_1 = 4$ с изменилась от $x_1 = 5$ м до $x_2 = -3$ м.

Решение. Модуль и направление вектора можно найти по его проекциям на оси координат. Так как точка движется равномерно, то проекцию её скорости на ось OX найдём по формуле

$$v_x = \frac{x_2 - x_1}{t_1}; \quad v_x = \frac{-3 - 5}{4}\ \text{м/с} = -2\ \text{м/с}.$$

Отрицательный знак проекции скорости означает, что скорость точки направлена противоположно положительному направлению оси OX. Модуль скорости $v = |v_x| = |-2\ \text{м/с}| = 2$ м/с.

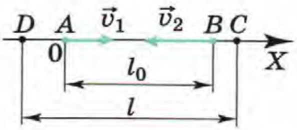


Рис. 1.14

Задача 2. Из пунктов A и B, расстояние между которыми вдоль прямого шоссе $l_0 = 20$ км, одновременно навстречу друг другу начали равномерно двигаться два автомобиля. Скорость первого автомобиля $v_1 = 50$ км/ч, а скорость второго автомобиля $v_2 = 60$ км/ч. Определите положение автомобилей относительно пункта A спустя время $t = 0{,}5$ ч после начала движения и расстояние l между автомобилями в этот момент времени. Определите пути s_1 и s_2, пройденные каждым автомобилем за время t.

Решение. Примем пункт A за начало координат и направим координатную ось OX в сторону пункта B (рис. 1.14). Движение автомобилей будет описываться уравнениями

$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t,\ x_2 = x_{02} + v_{2x}t.$$

Так как первый автомобиль движется в положительном направлении оси OX, а второй — в отрицательном, то $v_{1x} = v_1$, $v_{2x} = -v_2$. В соответствии с выбором начала координат $x_{01} = 0$, $x_{02} = l_0$. Поэтому спустя время t

$$x_1 = v_1t = 50\ \text{км/ч} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = 25\ \text{км};$$

$$x_2 = l_0 - v_2t = 20\ \text{км} - 60\ \text{км/ч} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = -10\ \text{км}.$$

Первый автомобиль будет находиться в точке C на расстоянии 25 км от пункта A справа, а второй — в точке D на расстоянии 10 км слева. Расстояние между автомобилями будет равно модулю разности их координат: $l = |x_2 - x_1| = |-10\ \text{км} - 25\ \text{км}| = 35$ км. Пройденные пути равны:

$$s_1 = v_1t = 50\ \text{км/ч} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = 25\ \text{км},$$
$$s_2 = v_2t = 60\ \text{км/ч} \cdot 0{,}5\ \text{ч} = 30\ \text{км}.$$

Задача 3. Из пункта A в пункт B выезжает первый автомобиль со скоростью v_1. Спустя время t_0 из пункта B в том же направлении со скоростью v_2 выезжает второй автомобиль. Расстояние между пунктами A и B равно l. Определите координату места встречи автомобилей относительно пункта B и время от момента отправления первого автомобиля, через которое они встретятся.

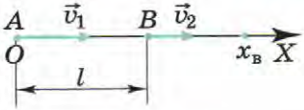


Рис. 1.15

Решение. Примем пункт A за начало координат и направим координатную ось OX в сторону пункта B (рис. 1.15). Движение автомобилей будет описываться уравнениями

$$x_1 = v_1 t,\ x_2 = l + v_2(t - t_0).$$

В момент встречи координаты автомобилей равны: $x_1 = x_2 = x_в$. Тогда $v_1 t_в = l + v_2(t_в - t_0)$ и время до встречи $t_в = \dfrac{l - v_2 t_0}{v_1 - v_2}$.

Очевидно, что решение имеет смысл при $v_1 > v_2$ и $l > v_2 t_0$ или при $v_1 < v_2$ и $l < v_2 t_0$. Координата места встречи $x_в = v_1 t_в = v_1 \dfrac{l - v_2 t_0}{v_1 - v_2}$.

Задача 4. На рисунке 1.16 представлены графики зависимости координат точек от времени. Определите по графикам: 1) скорости точек; 2) через какое время после начала движения они встретятся; 3) пути, пройденные точками до встречи. Напишите уравнения движения точек.

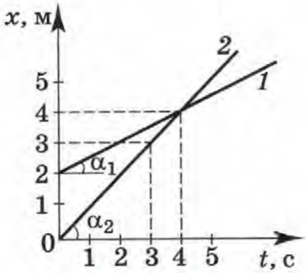


Рис. 1.16

Решение. За время, равное 4 с, изменение координаты первой точки: $\Delta x_1 = 4 - 2$ (м) $= 2$ м, второй точки: $\Delta x_2 = 4 - 0$ (м) $= 4$ м.

1) Скорости точек определим по формуле $v_x = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}$: $v_{1x} = 0{,}5$ м/с; $v_{2x} = 1$ м/с. Заметим, что эти же значения можно было получить по графикам, определив тангенсы углов наклона прямых к оси времени: скорость v_{1x} численно равна $\operatorname{tg}\alpha_1$, а скорость v_{2x} численно равна $\operatorname{tg}\alpha_2$.

2) Время встречи — это момент времени, когда координаты точек равны. Очевидно, что $t_в = 4$ с.

3) Пути, пройденные точками, равны их перемещениям и равны изменениям их координат за время до встречи: $s_1 = \Delta x_1 = 2$ м, $s_2 = \Delta x_2 = 4$ м.

Уравнения движения для обеих точек имеют вид $x = x_0 + v_x t$, где $x_0 = x_{01} = 2$ м, $v_{1x} = 0{,}5$ м/с — для первой точки; $x_0 = x_{02} = 0$, $v_{2x} = 1$ м/с — для второй точки.

Задачи для самостоятельного решения

1. При равномерном движении точки по прямой, совпадающей с осью OX, координата точки изменилась от 8 до -8 м. Определите время, в течение которого произошло изменение координаты, если модуль скорости равен 4 м/с. Какой путь прошла точка за это время?

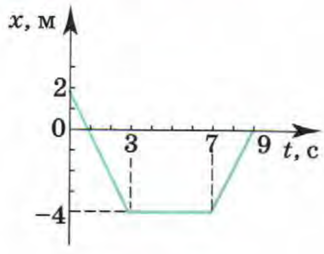


Рис. 1.17

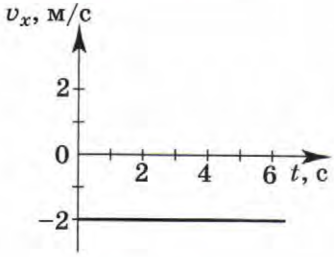
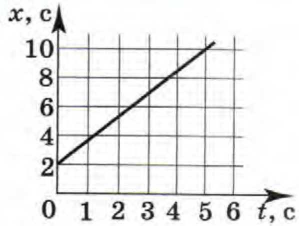


Рис. 1.18

2. На рисунке 1.17 изображён график зависимости координаты от времени для точки, движущейся вдоль оси OX. Опишите движение точки в интервалах времени от 0 до 3 с, от 3 до 7 с и от 7 до 9 с. Постройте графики модуля и проекции скорости в зависимости от времени. Начертите график зависимости пути от времени.

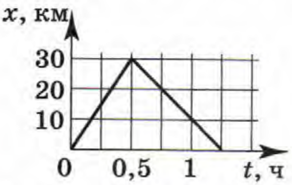
3. На рисунке 1.18 изображён график зависимости проекции скорости от времени при движении точки вдоль оси OX. Чему равен модуль скорости точки? В каком направлении оси OX она движется? Чему равно изменение координаты за 6 с, и какой путь пройден точкой за это время? Постройте график зависимости координаты от времени, если $x_0 = 6$ м. Постройте график зависимости пути от времени. В чём различие графиков?

4. Из пунктов, отстоящих друг от друга на расстоянии 90 км, одновременно выехали два автобуса со скоростями 60 и 30 км/ч, направленными вдоль прямого шоссе, соединяющего эти пункты. Через сколько времени автобусы встретятся? Рассмотрите все возможные случаи.



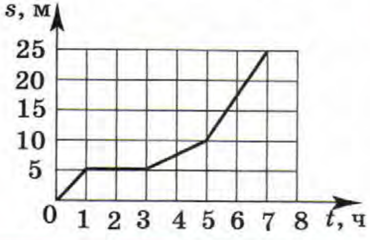
А1. На рисунке представлен график движения точки. Определите значение её координаты и скорости движения в момент времени 5 с.

1) 2 м; 1,6 м/с
2) 10 м; 2 м/с
3) 10 м; 1,6 м/с
4) 2 м; 2 м/с



А2. На рисунке представлен график движения автобуса из пункта A в пункт B и обратно. Пункт A находится в точке $x = 0$, а пункт B — в точке $x = 30$ км. Чему равна скорость автобуса на пути из A в B и из B в A?

1) 40 км/ч, 30 км/ч
2) 50 км/ч, 40 км/ч
3) 60 км/ч, 40 км/ч
4) 75 км/ч, 50 км/ч



А3. На рисунке представлен график зависимости пути s велосипедиста от времени t. В каком интервале времени велосипедист не двигался?

1) от 0 с до 1 с
2) от 1 с до 3 с
3) от 3 с до 5 с
4) от 5 с и далее

§ 6 СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Изменится ли движение, если мы будем его описывать в разных системах координат?
В любой ли системе координат удобно описывать движение?

Пусть по реке плывёт моторная лодка и нам известна её скорость $\vec{v_1}$ относительно воды, точнее, относительно системы координат K_1, движущейся вместе с водой (рис. 1.19).

Такую систему координат можно связать, например, с мячом, выпавшим из лодки и плывущим по течению. Если известна ещё и скорость течения реки $\vec{v}$ относительно системы координат K_2, связанной с берегом, т. е. скорость системы координат K_1 относительно системы координат K_2, то можно определить скорость лодки $\vec{v_2}$ относительно берега.

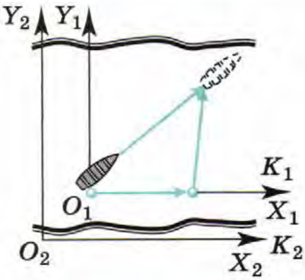


Рис. 1.19

За промежуток времени Δt перемещения лодки и мяча относительно берега равны $\Delta\vec{r_2}$ и $\Delta\vec{r}$ (рис. 1.20), а перемещение лодки относительно мяча равно $\Delta\vec{r_1}$. Из рисунка 1.20 видно, что

$$\Delta\vec{r_2} = \Delta\vec{r_1} + \Delta\vec{r}. \qquad (1.7)$$

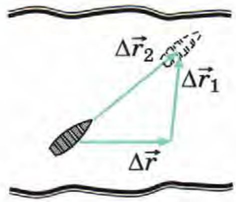


Рис. 1.20

Разделив левую и правую части уравнения (1.7) на Δt, получим

$$\frac{\Delta\vec{r_2}}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{r_1}}{\Delta t} + \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Учтём также, что отношения перемещений к интервалу времени равны скоростям. Поэтому

$$\boxed{\vec{v_2} = \vec{v_1} + \vec{v}.} \qquad (1.8)$$

Скорости складываются геометрически, как и все другие векторы. Уравнение (1.8) называют *законом сложения скоростей.*

Закон сложения скоростей

Если тело движется относительно некоторой системы координат K_1 со скоростью $\vec{v}$ и сама система K_1 движется относительно другой системы координат K_2 со скоростью $\vec{v}_1$, то скорость тела относительно второй системы равна геометрической сумме скоростей $\vec{v_1}$ и $\vec{v}$.

Как и любое векторное уравнение, уравнение (1.8) представляет собой компактную запись скалярных уравнений, в данном случае — для сложения проекций скоростей движения на плоскости:

$$\begin{aligned} v_{2x} &= v_{1x} + v_x, \\ v_{2y} &= v_{1y} + v_y. \end{aligned} \qquad (1.9)$$

Как запишется классический закон сложения скоростей, если неподвижной считать систему, связанную с мячом, а подвижной — с берегом?

Проекции скоростей складываются алгебраически.

Закон сложения скоростей позволяет определять скорость тела относительно разных систем отсчёта, движущихся относительно друг друга.

Важно Классический закон сложения скоростей справедлив для тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света.

Интересно Часто скорость тела относительно неподвижной системы координат называют **абсолютной скоростью**, относительно подвижной системы координат — **относительной**, а скорость тела отсчёта, связанного с подвижной системой, относительно неподвижной — **переносной скоростью**. Тогда закон сложения скоростей имеет вид $\vec{v}_а = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_{пер}$.

Понаблюдайте, с какой скоростью движутся тела относительно разных систем отсчёта, например пассажир, идущий вдоль движущегося вагона поезда и т. п.

Закон сложения скоростей Найти

1. Сформулируйте закон сложения скоростей.
2. Велосипедист движется по дорожке со скоростью $\vec{v}$. Чему равна скорость дорожки относительно велосипедиста?
3. Лодка плывёт через реку, выдерживая курс перпендикулярно берегам. Запишите для лодки закон сложения скоростей, связав неподвижную систему координат с водой.

А1. Два автомобиля движутся по прямой дороге в одном направлении: один — со скоростью 50 км/ч, а другой — со скоростью 70 км/ч. При этом они

1) сближаются
2) удаляются
3) не изменяют расстояние друг от друга
4) могут сближаться, а могут удаляться

А2. Два автомобиля движутся в одном направлении по прямому шоссе. Скорость первого равна $\vec{v}$, а скорость второго $2\vec{v}$. Чему равна скорость первого автомобиля относительно второго?

1) 0 2) $\vec{v}$ 3) $2\vec{v}$ 4) $-\vec{v}$

А3. Катер, двигаясь вдоль по реке, проходит 2 км по течению, разворачивается (мгновенно) и возвращается в пункт отправления. Скорость катера относительно воды 36 км/ч, а скорость течения реки 4 км/ч. Полное время движения катера туда и обратно равно

1) 4 мин 2) 6,75 мин 3) 12,5 мин 4) 21,1 мин

А4. Пловец переплывает реку по кратчайшему пути. Скорость пловца относительно воды 5 км/ч, скорость течения 3 км/ч. Скорость пловца относительно берега равна

1) 2 км/ч 2) 3 км/ч 3) 4 км/ч 4) 8 км/ч

§ 7 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ»

При решении задач на эту тему прежде всего надо грамотно выбрать тело отсчёта, с которым связать неподвижную систему координат. Затем выбрать тело отсчёта, движущееся относительно первого, и связать с ним подвижную систему координат. В этих двух системах рассмотреть движение тела и записать закон сложения скоростей.

Задача 1. Два поезда движутся равномерно друг за другом. Скорость первого равна 80 км/ч, а скорость второго — 60 км/ч. Определите скорость второго поезда относительно первого.

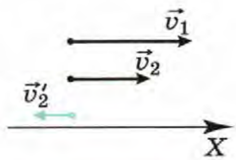


Рис. 1.21

Р е ш е н и е. Обозначим скорость первого поезда относительно земли через $\vec{v}_1$, а скорость второго поезда — через $\vec{v}_2$. Тогда согласно закону сложения скоростей (1.9)

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_2' + \vec{v}_1,$$

где $\vec{v}_2'$ — искомая скорость второго поезда относительно первого. Отсюда

$$\vec{v}_2' = \vec{v}_2 - \vec{v}_1.$$

Это сложение скоростей поясняется на рисунке 1.21. Из рисунка видно, что скорость второго поезда относительно первого направлена в сторону, противоположную направлению движения поездов, и второй поезд удаляется от первого. Проекция скорости $\vec{v}_2'$ на ось OX равна

$$v_2' = v_2 - v_1 = -20 \text{ км/ч}.$$

Задача 2. Скорость течения реки $v = 1{,}5$ м/с. Определите модуль скорости v_1 катера относительно воды, если катер движется перпендикулярно к берегу со скоростью $v_2 = 2$ м/с относительно его.

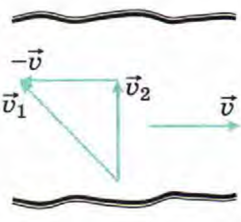


Рис. 1.22

Р е ш е н и е. Согласно закону сложения скоростей (1.9)

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}.$$

Отсюда скорость катера относительно воды

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

Векторное сложение скоростей $\vec{v}$ и $\vec{v}_2$ показано на рисунке 1.22.

Так как полученный треугольник скоростей прямоугольный, то $v_1 = 2{,}5$ м/с.

Задача 3. Самолёт, скорость которого относительно воздуха равна 300 км/ч, летит на север. Внезапно подул северо-западный ветер со скоростью 100 км/ч относительно земли. Определите, под каким углом к направлению на запад лётчик должен направлять самолёт, чтобы продолжать лететь на север, и чему при этом будет равна скорость самолёта относительно земли.

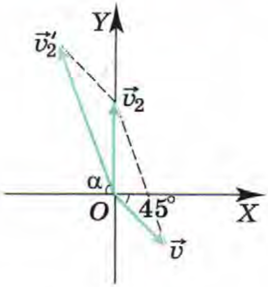


Рис. 1.23

Р е ш е н и е. Свяжем неподвижную систему отсчёта с землёй, а подвижную — с воздухом. Тогда согласно закону сложения скоростей скорость $\vec{v_2}$ самолёта относительно земли равна сумме скоростей $\vec{v_2'}$ самолёта относительно воздуха и $\vec{v}$ ветра относительно земли:

$$\vec{v_2} = \vec{v_2'} + \vec{v}. \tag{1}$$

На рисунке 1.23 показаны скорость $\vec{v}$ ветра, скорость $\vec{v_2'}$ самолёта и скорость $\vec{v_2}$ самолёта относительно земли. Мы направляем скорости так, чтобы проекции скорости самолёта относительно ветра и скорости ветра на оси OX были равны по модулю и направлены в противоположные стороны: $v'_{2x} = -v_x$. Соответственно

$$v_2'\cos\alpha = v\cos 45°. \tag{2}$$

В проекции на ось OY уравнение (1) запишем в виде $v_{2y} = v'_{2y} + v_y$.

Тогда $v_{2y} = v_2'\sin\alpha - v\sin 45°$, это искомая скорость самолёта.

Из уравнения (2) найдем угол α:

$$\cos\alpha = \frac{v}{v_2'}\cos 45°. \tag{3}$$

Подставим числовые значения: $\cos\alpha = \dfrac{100}{300}\cdot 0{,}707 = 0{,}236;\ \alpha = 76°.$

Из уравнения (3) выразим $\sin\alpha$: $\sin\alpha = \sqrt{1-\left(\dfrac{v}{v_2'}\cos 45°\right)^2}.$

Скорость самолёта $v_{2y} = v_2'\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{v_2'}\cos 45°\right)^2} - v\sin 45° \approx 220$ км/ч.

Задачи для самостоятельного решения

1. Скорость катера относительно воды равна 36 км/ч, а скорость течения равна 9 км/ч. На одном берегу реки находятся две пристани. Расстояние между ними равно 90 км. Какое время затратит катер на прохождение пути между пристанями по течению и обратно?

2. По двум параллельным железнодорожным путям навстречу друг другу равномерно движутся два поезда со скоростями 72 км/ч и 108 км/ч. Длина первого поезда 900 м, второго — 140 м. В течение какого времени один поезд пройдёт мимо другого?

3. Капли дождя падают отвесно относительно земли со скоростью 35 м/с. Какую наименьшую скорость относительно земли должен иметь автомобиль, чтобы на заднем смотровом стекле, наклонённом под углом 60° к горизонту, не оставалось следов капель? Завихрения воздуха не учитывайте.

4. Эскалатор метро спускает идущего по нему человека вниз за 1 мин. Если человек идёт вдвое быстрее, то он спустится за 45 с. Сколько времени будет спускаться человек, стоящий на эскалаторе?

§ 8 МГНОВЕННАЯ И СРЕДНЯЯ СКОРОСТИ

Как вы думаете, какую скорость показывает спидометр?
Может ли городской транспорт двигаться равномерно и прямолинейно?

Понаблюдайте за движением различных тел. Какие из них всё время изменяют скорость при движении, а какие движутся практически равномерно в течение длительного промежутка времени?

Реальные тела (человек, автомобиль, ракета, теплоход и т. д.), как правило, не движутся с постоянной скоростью. Они начинают двигаться из состояния покоя, и их скорость увеличивается постепенно, при остановке скорость уменьшается также постепенно, таким образом, реальные тела движутся неравномерно.

Неравномерное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным.

Чтобы полностью описать неравномерное движение точки, надо знать её положение и скорость в каждый момент времени.

Запомни Скорость точки в данный момент времени называется **мгновенной скоростью**.

Что же понимают под мгновенной скоростью?

Пусть точка, двигаясь неравномерно и по кривой линии, в некоторый момент времени t занимает положение M (рис. 1.24). По прошествии времени Δt_1 от этого момента точка займёт положение M_1, совершив перемещение $\Delta\vec{r_1}$. Поделив вектор $\Delta\vec{r_1}$ на промежуток времени Δt_1, найдём такую скорость равномерного прямолинейного движения, с которой должна была бы двигаться точка, чтобы за время Δt попасть из положения M в положение M_1. Эту скорость называют *средней* скоростью перемещения точки за время Δt_1.

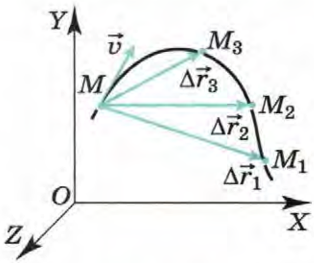


Рис. 1.24

Обозначив её через $\vec{v}_{\text{ср}1}$, запишем: $\vec{v}_{\text{ср}1} = \dfrac{\Delta\vec{r_1}}{\Delta t_1}$. Средняя скорость направлена вдоль секущей MM_1. По той же формуле мы находим скорость точки при равномерном прямолинейном движении.

Запомни Скорость, с которой должна равномерно и прямолинейно двигаться точка, чтобы попасть из начального положения в конечное за определённый промежуток времени, называется **средней скоростью** перемещения.

Для того чтобы определить скорость в данный момент времени, когда точка занимает положение M, найдём средние скорости за всё меньшие и меньшие промежутки времени:

$$\vec{v}_{\text{ср}2} = \frac{\Delta\vec{r_2}}{\Delta t_2}, \;\; v_{\text{ср}3} = \frac{\Delta\vec{r_3}}{\Delta t_3}.$$

Верно ли следующее определение мгновенной скорости: «Скорость тела в данной точке траектории называется мгновенной скоростью»?

При уменьшении промежутка времени Δt перемещения точки уменьшаются по модулю и меняются по направлению. Соответственно этому средние скорости также меняются как по модулю, так и по направлению. Но по мере приближения промежутка времени Δt к нулю средние скорости всё меньше и меньше будут отличаться друг от друга. А это означает, что при стремлении промежутка времени Δt к нулю отношение $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ стремится к определённому вектору как к своему предельному значению. В механике такую величину называют скоростью точки в данный момент времени или просто *мгновенной скоростью* и обозначают $\vec{v}$.

Запомни **Мгновенная скорость** точки есть величина, равная пределу отношения перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, в течение которого это перемещение произошло, при стремлении промежутка Δt к нулю.

Выясним теперь, как направлен вектор мгновенной скорости. В любой точке траектории вектор мгновенной скорости направлен так, как в пределе, при стремлении промежутка времени Δt к нулю, направлена средняя скорость перемещения. Эта средняя скорость в течение промежутка времени Δt направлена так, как направлен вектор перемещения $\Delta\vec{r}$. Из рисунка 1.24 видно, что при уменьшении промежутка времени Δt вектор $\Delta\vec{r}$, уменьшая свою длину, одновременно поворачивается. Чем короче становится вектор $\Delta\vec{r}$, тем ближе он к касательной, проведённой к траектории в данной точке M, т. е. секущая переходит в касательную. Следовательно,

Важно мгновенная скорость направлена по касательной к траектории (см. рис. 1.24).

Рис. 1.25

В частности, скорость точки, движущейся по окружности, направлена по касательной к этой окружности. В этом нетрудно убедиться. Если маленькие частички отделяются от вращающегося диска, то они летят по касательной, так как имеют в момент отрыва скорость, равную скорости точек на окружности диска. Вот почему грязь из-под колёс буксующей автомашины летит по касательной к окружности колёс (рис. 1.25).

Понятие мгновенной скорости — одно из основных понятий кинематики. Это понятие относится к точке. Поэтому в дальнейшем, говоря о скорости движения тела, которое нельзя считать точкой, мы можем говорить о скорости какой-нибудь его точки.

Помимо средней скорости перемещения, для описания движения чаще пользуются средней путевой скоростью $v_{\text{срs}}$.

Запомни **Средняя путевая скорость** определяется отношением пути к промежутку времени, за который этот путь пройден:

$$v_{\text{срs}} = \frac{s}{t}. \tag{1.10}$$

Когда мы говорим, что путь от Москвы до Санкт-Петербурга поезд прошёл со скоростью 80 км/ч, мы имеем в виду именно среднюю путевую скорость движения поезда между этими городами. Модуль средней скорости перемещения при этом будет меньше средней путевой скорости, так как $s > |\Delta\vec{r}|$.

Начертите произвольную кривую. Пусть вдоль неё движется точка. Выберите на кривой несколько точек и начертите вектор мгновенной скорости, если: а) модуль скорости не изменяется; б) модуль скорости уменьшается на одно и то же значение через равные отрезки пути.

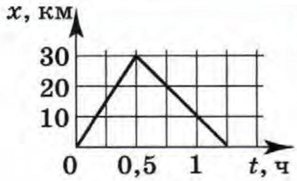
Важно Для неравномерного движения также справедлив закон сложения скоростей. В этом случае складываются мгновенные скорости.

Мгновенная скорость. Средняя скорость. Средняя путевая скорость Найти

1. Что называется средней скоростью перемещения?
2. Что такое мгновенная скорость?
3. Как направлена мгновенная скорость в данной точке траектории?
4. Точка движется по криволинейной траектории так, что модуль её скорости не изменяется. Означает ли это, что скорость точки постоянна?
5. Что такое средняя путевая скорость?

A1. На рисунке представлен график зависимости координаты тела от времени. Средняя скорость движения тела равна

1) 48 км/ч
2) 60 км/ч
3) 40 км/ч
4) 0

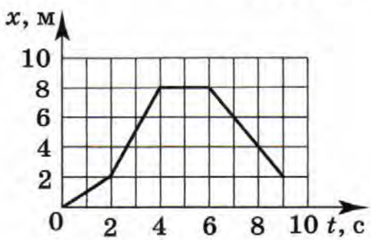


A2. Уравнение движения тела $x = 4 + 5t$. Все величины выражены в СИ. Через время, равное 2 с после начала движения, скорость тела равна

1) 7 м/с
2) 2,5 м/с
3) 5 м/с
4) 14 м/с

A3. На рисунке показана зависимость координаты тела от времени. Определите максимальное значение модуля мгновенной скорости.

1) 1 м/с
2) 3 м/с
3) 2 м/с
4) 8/9 м/с



A4. Определите значения средней путевой скорости и модуля средней скорости перемещения за 9 с (см. рис. к тесту А3).

1) 14/9 м/с, 2/9 м/с
2) 2/3 м/с, 2/3 м/с
3) 2 м/с, 2/9 м/с
4) 1/3 м/с, 16/9 м/с

§ 9 УСКОРЕНИЕ

Как изменяются показания спидометра в начале движения и при торможении автомобиля?
Какая физическая величина характеризует изменение скорости?

Подбросьте вверх мяч и сделайте вывод об изменении его скорости.

При движении тел их скорости обычно меняются либо по модулю, либо по направлению, либо же одновременно как по модулю, так и по направлению.

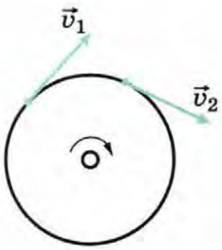


Рис. 1.26

Скорость шайбы, скользящей по льду, уменьшается с течением времени до полной остановки. Если взять в руки камень и разжать пальцы, то при падении камня его скорость постепенно нарастает. Скорость любой точки окружности точильного круга при неизменном числе оборотов в единицу времени меняется только по направлению, оставаясь постоянной по модулю (рис 1.26). Если бросить камень под углом к горизонту, то его скорость будет меняться и по модулю, и по направлению.

Изменение скорости тела может происходить как очень быстро (движение пули в канале ствола при выстреле из винтовки), так и сравнительно медленно (движение поезда при его отправлении).

Запомни Физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости, называется **ускорением**.

Рассмотрим случай криволинейного и неравномерного движения точки. В этом случае её скорость с течением времени изменяется как по модулю, так и по направлению. Пусть в некоторый момент времени t точка занимает положение M и имеет скорость $\vec{v}$ (рис. 1.27). Спустя промежуток времени Δt_1 точка займёт положение M_1 и будет иметь скорость $\vec{v}_1$. Изменение скорости за время Δt_1 равно $\Delta\vec{v}_1 = \vec{v}_1 - \vec{v}$. Вычитание вектора $\vec{v}$ можно произвести путём прибавления к вектору $\vec{v}_1$ вектора $(-\vec{v})$:

$$\Delta\vec{v}_1 = \vec{v}_1 - \vec{v} = \vec{v}_1 + (-\vec{v}).$$

Согласно правилу сложения векторов вектор изменения скорости $\Delta\vec{v}_1$ направлен из начала вектора $\vec{v}_1$ в конец вектора $(-\vec{v})$, как это показано на рисунке 1.28.

Понаблюдайте за началом движения какого-либо тела. Что вы можете сказать о его скорости?

Приведите друг другу примеры движения тел, при которых изменения скорости происходят только по направлению или только по модулю.

Поделив вектор $\Delta\vec{v}_1$ на промежуток времени Δt_1, получим вектор, направленный так же, как и вектор изменения скорости $\Delta\vec{v}_1$. Этот вектор называют средним ускорением точки за промежуток времени Δt_1. Обозначив его через $\vec{a}_{\text{ср}1}$, запишем:

$$\vec{a}_{\text{ср}1} = \frac{\Delta\vec{v}_1}{\Delta t}.$$

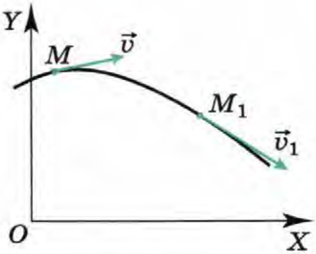


Рис. 1.27

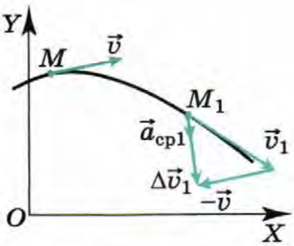


Рис. 1.28

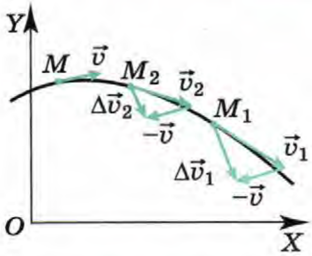


Рис. 1.29

По аналогии с определением мгновенной скорости определим *мгновенное ускорение*. Для этого найдём теперь средние ускорения точки за всё меньшие и меньшие промежутки времени:

$$\vec{a}_{\text{ср}2} = \frac{\Delta\vec{v}_2}{\Delta t}, \ldots .$$

При уменьшении промежутка времени Δt вектор $\Delta\vec{v}$ уменьшается по модулю и меняется по направлению (рис. 1.29). Соответственно средние ускорения также меняются по модулю и направлению. Но при стремлении промежутка времени Δt к нулю отношение изменения скорости к изменению времени стремится к определённому вектору как к своему предельному значению. В механике эту величину называют ускорением точки в данный момент времени или просто ускорением и обозначают $\vec{a}$.

Запомни **Ускорение точки** — это предел отношения изменения скорости $\Delta\vec{v}$ к промежутку времени Δt, в течение которого это изменение произошло, при стремлении Δt к нулю.

Ускорение направлено так, как направлен вектор изменения скорости $\Delta\vec{v}$ при стремлении промежутка времени Δt к нулю. В отличие от направления скорости, направление вектора ускорения нельзя определить, зная траекторию точки и направление движения точки по траектории. В дальнейшем на простых примерах мы увидим, как можно определить направление ускорения точки при прямолинейном и криволинейном движениях.

В общем случае ускорение направлено под углом к вектору скорости (рис. 1.30). Полное ускорение характеризует изменение скорости и по модулю, и по направлению. Часто полное ускорение $\vec{a}$ считается равным векторной сумме двух ускорений — касательного ($\vec{a}_{\text{к}}$) и центростремительного ($\vec{a}_{\text{цс}}$). Касательное ускорение $\vec{a}_{\text{к}}$ характеризует изменение скорости по модулю и направлено по касательной к траектории движения. Центростремительное ускорение $\vec{a}_{\text{цс}}$ характеризует изменение скорости по направлению и перпендикулярно касательной, т. е. направлено к центру кривизны траектории в данной точке. В дальнейшем мы рассмотрим два частных случая: точка движется по прямой и скорость изменяется только по модулю; точка движется равномерно по окружности и скорость изменяется только по направлению.

Рис. 1.30

Единица ускорения. Движение точки может происходить как с переменным, так и с постоянным ускорением. Если ускорение точки постоянно, то отношение изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло, будет одним и тем же для любого интервала времени. Поэтому, обозначив через Δt некоторый произвольный промежуток времени, а через $\Delta\vec{v}$ — изменение скорости за этот промежуток, можно записать:

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

Так как промежуток времени Δt — величина положительная, то из этой формулы следует, что если ускорение точки с течением времени не изменяется, то оно направлено так же, как и вектор изменения скорости. Таким образом, если ускорение постоянно, то его можно истолковать как изменение скорости в единицу времени. Это позволяет установить единицы модуля ускорения и его проекций.

Запишем выражение для модуля ускорения:

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

Отсюда следует, что

Важно модуль ускорения численно равен единице, если за единицу времени модуль вектора изменения скорости изменяется на единицу.

Если время измерено в секундах, а скорость — в метрах в секунду, то единица ускорения — м/с^2 (метр на секунду в квадрате).

Ускорение. Касательное, центростремительное ускорения Найти

1. Что называется ускорением?
2. Куда направлено ускорение при прямолинейном движении точки, если модуль скорости точки увеличивается? уменьшается?
3. Точка движется по криволинейной траектории с постоянной по модулю скоростью. Имеет ли эта точка ускорение?
4. Может ли точка иметь ускорение, если её скорость в данный момент времени равна нулю?
5. В каких единицах выражается ускорение?
6. Автомобиль движется по шоссе с постоянной скоростью и начинает тормозить. Как направлена проекция ускорения на ось, направленную по вектору начальной скорости автомобиля?
7. Как направлено ускорение равномерно движущейся по окружности точки?
8. Можно ли утверждать, что если ускорение точки постоянно, то направление её скорости не изменяется?
9. Лыжник съехал с горы, двигаясь прямолинейно и равноускоренно. За время 20 с, в течение которых длился спуск, скорость лыжника возросла от 5 м/с до 15 м/с. С каким ускорением двигался лыжник?

§ 10 ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ

Какая величина, характеризующая движение точки, не зависит от выбора системы отсчёта?
Может ли в одной системе отсчёта точка покоиться, а в другой двигаться?

Выясним зависимость скорости точки от времени при её движении с постоянным ускорением. Для этого воспользуемся формулой

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

Пусть $\vec{v}_0$ — скорость точки в начальный момент времени t_0, а $\vec{v}$ — её скорость в некоторый момент времени t, тогда за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ изменение скорости $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$, и формула для ускорения примет вид

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

Если начальный момент времени t_0 принять равным нулю, то получим

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

Отсюда получим *формулу для определения скорости точки в любой момент времени при её движении с постоянным ускорением*:

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.} \qquad (1.11)$$

Векторному уравнению (1.11) соответствуют в случае движения на плоскости два скалярных уравнения для проекций скорости на координатные оси X и Y:

$$\boxed{\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \\ v_y &= v_{0y} + a_y t. \end{aligned}} \qquad (1.12)$$

Как видим, при движении с постоянным ускорением скорость со временем меняется по линейному закону.

Итак, для определения скорости в произвольный момент времени надо знать начальную скорость $\vec{v}_0$ и ускорение $\vec{a}$. Начальную скорость нужно измерить. Ускорение, как мы увидим в дальнейшем, можно вычислить. Начальная скорость зависит от условий, при которых началось движение. Начальная скорость, например, падающего камня зависит от того, выпустили его из рук или же бросили, совершив некоторое усилие.

Ускорение же, наоборот, не зависит от того, что происходило с телом в предыдущие моменты, а зависит лишь от действия на него других тел в данный момент времени.

Зависимость проекции скорости от времени можно изобразить наглядно с помощью графика.

Если начальная скорость равна нулю, то график зависимости

Одинакова ли будет конечная скорость камня, если его сначала бросить вверх с некоторой начальной скоростью, а затем вниз с такой же начальной скоростью?

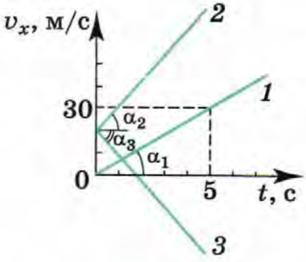


Рис. 1.31

проекции скорости на ось X от времени имеет вид прямой, выходящей из начала координат. Такая зависимость скорости от времени наблюдается при падении тела, покоившегося в начальный момент времени, с некоторой высоты или при движении автомобиля, трогающегося с места. На рисунке 1.31 представлен этот график в виде прямой *1* для случая $a_x > 0$. По этому графику можно найти проекцию ускорения на ось X:

$$a_x = \frac{v_x}{t}; \quad a_x = \frac{30\ \text{м/с}}{5\ \text{с}} = 6\ \text{м/с}^2.$$

Чем больше a_x, тем больший угол α с осью времени составляет график проекции скорости, так как за тот же промежуток времени скорость изменяется больше.

Если начальная скорость отлична от нуля и тело движется с бо́льшим, но также постоянным ускорением, то график зависимости проекции скорости от времени имеет вид прямой *2* (см. рис. 1.31).

В случае равнозамедленного движения с той же начальной скоростью график зависимости v_x от времени имеет вид прямой *3*. Обратите внимание: так как углы α_2 и α_3 по модулю равны, то равны по модулю проекции ускорения: $|a_{x2}| = |a_{x3}|$.

Теперь получим уравнения, которые позволяют рассчитывать для этого движения положение точки в любой момент времени.

Допустим, движение с постоянным ускорением совершается в одной плоскости, пусть это будет плоскость XOY. Если вектор начальной скорости и вектор ускорения не лежат на одной прямой, то точка будет двигаться по кривой линии. Следовательно, в этом случае с течением времени будут изменяться обе её координаты x и y. Обозначим через x_0 и y_0 координаты в начальный момент времени $t_0 = 0$, а через x и y координаты в момент времени t. Тогда за время $\Delta t = t - t_0 = t$ изменения координат будут равны

$$\Delta x = x - x_0 \text{ и } \Delta y = y - y_0.$$

Отсюда

$$x = x_0 + \Delta x, \\ y = y_0 + \Delta y. \tag{1.13}$$

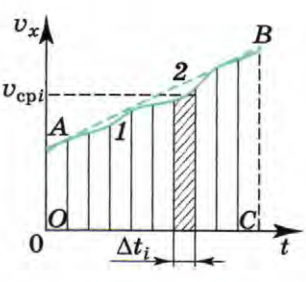


Рис. 1.32

Значит, для нахождения положения точки в любой момент времени надо знать её начальные координаты и уметь находить изменения координат Δx и Δy за время движения.

В случае движения, при котором проекция скорости изменяется со временем (рис. 1.32, кривая *1*), величину Δx за время t найдём следующим образом. Из § 4 мы знаем, что при равномерном движении изменение координаты точки за время Δt можно определить на графике зависимости $v_x(t)$ по площади прямоугольника. На рисунке 1.32 длина отрезка OC численно равна времени движения.

Разделим его на малые интервалы Δt, в пределах которых проекцию скорости можно считать постоянной и равной её среднему значению. Рассмотрим интервал Δt_i. Тогда $\Delta x_i = v_{i\text{ср}}\Delta t_i$, и соответственно площадь заштрихованного прямоугольника численно равна изменению координаты точки за время Δt_i. Сумма всех таких площадей численно равна изменению координаты точки за время t. Чем меньше интервал Δt, тем точнее будет результат. При стремлении Δt к нулю значение площади фигуры $ABCO$ будет стремиться к числовому значению изменения координаты точки Δx.

> Можно ли по графику зависимости $v_x(t)$ определить путь, пройденный телом?

В случае равноускоренного (a_x = const) движения (рис. 1.32, прямая *2*) изменение координаты тела Δx численно равно площади трапеции $ABCO$. Длины оснований OA и BC этой трапеции численно равны проекциям начальной и конечной скоростей, а длина высоты OC — времени движения.

По формуле для площади трапеции имеем

$$\Delta x = \frac{v_{0x} + v_x}{2}t.$$

Учитывая, что $v_x = v_{0x} + a_x t$, получаем

$$\Delta x = \frac{v_{0x}+v_{0x}+a_x t}{2}t = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

> Как по графику (см. рис. 1.32), используя тот факт, что площадь фигуры под графиком численно равна изменению координаты, определить среднюю скорость движения?

Мы рассмотрели случай, когда $v_{0x} > 0$ и $a_x > 0$. Но полученная формула справедлива и тогда, когда одна из этих величин отрицательна или когда обе они отрицательны.

Изменение координаты Δy можно найти таким же способом, и выражение имеет аналогичный вид

$$\Delta y = v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

Подставив найденные выражения для изменения координат Δx и Δy в формулы (1.13), получим уравнения для координат при движении с постоянным ускорением как функции времени (их называют кинематическими уравнениями движения):

$$\boxed{\begin{aligned} x &= x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},\\ y &= y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \end{aligned}} \qquad (1.14)$$

> Запишите кинематические уравнения движения точки в пространстве.

Важно Эти формулы применимы для описания как прямолинейного, так и криволинейного движения точки. Важно лишь, чтобы ускорение было постоянным.

Обычно в условиях задачи даются значения (модули) скоростей и ускорений. Поэтому удобнее использовать уравнение $x = x_0 \pm v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$, где v_0 и a — модули начальной скорости и ускорения. Очевидно, что в этом уравнении знак «+» берётся тогда, когда направления скорости $\vec{v}_0$ и ускорения

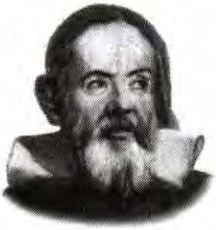
$\vec{a}$ совпадают с направлением оси OX, знак «−» — когда они направлены в противоположную сторону.

Запомни Движение вдоль прямой с постоянным ускорением, при котором модуль скорости увеличивается, называется **прямолинейным равноускоренным движением**, а прямолинейное движение с постоянным ускорением, при котором модуль скорости уменьшается, называется **равнозамедленным**.

При движении точки в плоскости XOY двум уравнениям (1.14) соответствует одно векторное уравнение

$$\boxed{\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.} \tag{1.15}$$

Обратите внимание на то, что с помощью формул (1.14) и (1.15) можно найти только положение движущейся точки в любой момент времени. Для нахождения пути необходимо более подробно исследовать траекторию, определить точки, в которых, возможно, произошло изменение направления движения.



Г. Галилей
(1564—1642)

Свободное падение тел. Вспомним теперь частный случай движения с постоянным ускорением, которое называется *свободным падением* тел. Это движение опытным путём изучал великий итальянский учёный Галилео Галилей.

Каждый из нас наблюдал, что при падении тела на Землю из состояния покоя оно увеличивает свою скорость, т. е. движется с ускорением. Это ускорение сообщает ему земной шар. Долгое время считали, что Земля сообщает разным телам различные ускорения. Простые наблюдения как будто подтверждают это. Например, птичье перо или лист бумаги падают гораздо медленнее, чем камень. Вот почему со времён Аристотеля (греческого учёного, жившего в IV в. до н. э.) считалось незыблемым мнение, что ускорение, сообщаемое Землёй телу, тем больше, чем тяжелее тело.

Только Галилею в конце XVI в. удалось опытным путём доказать, что в действительности это не так. Нужно учитывать сопротивление воздуха. Именно оно искажает картину свободного падения тел, которую можно было бы наблюдать в отсутствие земной атмосферы.

Интересно Прост и убедителен опыт, проведённый впервые Ньютоном. В стеклянную трубку помещают различные предметы: дробинки, кусочки пробки, пушинки и т. д. Если перевернуть трубку так, чтобы эти предметы могли падать, то быстрее всего упадёт дробинка, за ней — кусочек пробки и наконец плавно опустится пушинка. Но если выкачать из трубки воздух, то мы увидим, что все три тела упадут одновременно. Значит, движение пушинки задерживалось ранее сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении, например, пробки. Когда же на эти тела действует только притяжение к Земле, то все они падают с одним и тем же ускорением.

Важно Если пренебречь сопротивлением воздуха, то можно считать, что вблизи поверхности Земли ускорение всех падающих тел одинаково и постоянно.

Запомни Движение тела только под влиянием притяжения его к Земле называют **свободным падением**, а ускорение, сообщаемое Землёй всем телам, называют **ускорением свободного падения**. Оно всегда направлено вертикально вниз, т. е. вдоль нити отвеса, определяющей вертикаль. Его принято обозначать $\vec{g}$.

Свободное падение — это не обязательно движение вниз. Если начальная скорость направлена вверх, то тело при свободном падении некоторое время будет лететь вверх, уменьшая свою скорость, и лишь затем начнёт падать.

Интересно Ускорение свободного падения изменяется в зависимости от географической широты места на поверхности Земли и от высоты тела над Землёй, точнее, от расстояния до центра Земли. На широте Москвы измерения дают следующее значение ускорения свободного падения: $g \approx 9{,}82$ м/с^2. Вообще же на поверхности Земли g меняется в пределах от 9,78 м/с^2 на экваторе до 9,83 м/с^2 на полюсе.
Если подняться на 1 км над уровнем моря, то ускорение свободного падения уменьшится примерно на 0,00032 своего значения в данном месте Земли. На высоте 100 км над полюсом Земли оно примерно равно 9,53 м/с^2.

При падении тел в воздухе на их движение влияет сопротивление воздуха. Поэтому ускорение тел не равно $\vec{g}$. Но когда движутся такие тела, как камень, спортивное ядро и т. д., сопротивление воздуха влияет на их движение незначительно. В этом случае движение тел можно рассматривать как свободное падение. Лишь при больших скоростях (снаряд, пуля и т. д.) сопротивление воздуха становится существенным. Для лёгких тел типа пушинки сопротивление воздуха существенно и при малых скоростях.

Движение с постоянным ускорением. Свободное падение — Найти

1. В каком случае ускорение тела считается постоянным?
2. Куда направлено ускорение тела при его равноускоренном движении? при равнозамедленном движении?
3. Точка движется равноускоренно. Чему равен модуль изменения скорости за 5 с, если модуль ускорения равен 0,5 м/с^2?

А1. Зависимость координаты точки от времени $x = 8t - t^2$ (все величины в СИ). В какой момент времени скорость точки равна −2 м/с?
1) 4 с 2) 5 с 3) 8 с 4) 2 с

А2. Проекции скорости на оси OX и OY изменяются согласно уравнениям $v_x = 4 - 3t$, $v_y = 4t$. Ускорение, с которым движется точка, равно
1) 2 м/с^2 2) 4 м/с^2 3) −1 м/с^2 4) 5 м/с^2

А3. К. Э. Циолковский в книге «Вне Земли», описывая полёт ракеты, отмечал, что через 10 с после старта ракета находилась на расстоянии 5 км от поверхности Земли. С каким ускорением двигалась ракета?
1) 1000 м/с^2 2) 500 м/с^2 3) 100 м/с^2 4) 50 м/с^2

А4. Зависимость координаты от времени для некоторой точки описывается уравнением $x = 5 + 16t - 2t^2$. В какой момент времени проекция скорости точки на ось OX равна нулю?
1) 8 с 2) 4 с 3) 3 с 4) 0 с

§ 11 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИКОВ

Чем отличается равномерное движение от равноускоренного?
Чем отличается график пути при равноускоренном движении от графика пути при равномерном движении?
Что называется проекцией вектора на какую-либо ось?

В § 4 мы показали, как в случае равномерного прямолинейного движения можно определить скорость по графику зависимости координаты от времени.

Важно Проекция скорости численно равна тангенсу угла наклона прямой $x(t)$ к оси абсцисс. При этом, чем больше скорость, тем больше угол наклона.

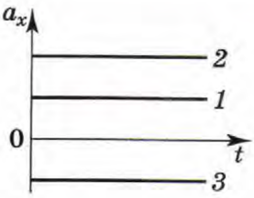


Рис. 1.33

Прямолинейное равноускоренное движение. На рисунке 1.33 изображены графики зависимости проекции ускорения от времени для трёх разных значений ускорения при прямолинейном равноускоренном движении точки. Они представляют собой прямые линии, параллельные оси абсцисс: a_x = const. Графики *1* и *2* соответствуют движению, когда вектор ускорения направлен вдоль оси OX, график *3* — когда вектор ускорения направлен в противоположную оси OX сторону.

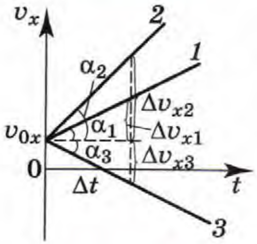


Рис. 1.34

При равноускоренном движении проекция скорости зависит от времени линейно: $v_x = v_{0x} + a_x t$. На рисунке 1.34 представлены графики этой зависимости для указанных трёх случаев. При этом начальная скорость точки одинакова. Проанализируем этот график.

Проекция ускорения $a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t}$. Из графика видно, что, чем больше ускорение точки, тем больше угол наклона прямой к оси t и соответственно больше тангенс угла наклона, который определяет значение ускорения.

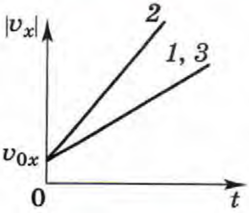


Рис. 1.35

За один и тот же промежуток времени при разных ускорениях скорость изменяется на разные значения.

При положительном значении проекции ускорения за один и тот же промежуток времени проекция скорости в случае *2* увеличивается в 2 раза быстрее, чем в случае *1*. При отрицательном значении проекции ускорения на ось OX проекция скорости по модулю изменяется на то же значение, что и в случае *1*, но скорость уменьшается.

От чего зависит единица, в которой выражается ускорение?

Для случаев *1* и *3* графики зависимости модуля скорости от времени будут совпадать (рис. 1.35).

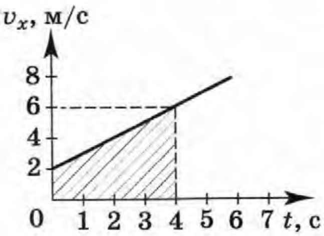


Рис. 1.36

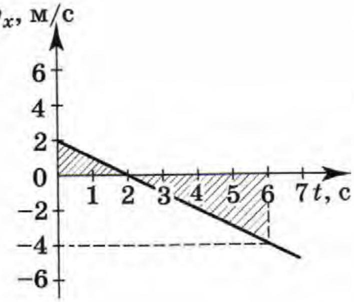


Рис. 1.37

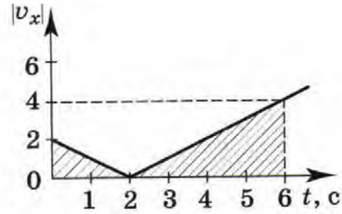


Рис. 1.38

Используя график зависимости скорости от времени (рис. 1.36), найдём изменение координаты точки. Это изменение численно равно площади заштрихованной трапеции, в данном случае изменение координаты за 4 с $\Delta x = 16$ м.

Мы нашли изменение координаты. Если необходимо найти координату точки, то к найденному числу нужно прибавить её начальное значение. Пусть в начальный момент времени $x_0 = 2$ м, тогда значение координаты точки в заданный момент времени, равный 4 с, равно 18 м. В данном случае модуль перемещения равен пути, пройденному точкой, или изменению её координаты, т. е. 16 м.

Если движение равнозамедленное, то точка в течение выбранного интервала времени может остановиться и начать двигаться в направлении, противоположном начальному. На рисунке 1.37 показана зависимость проекции скорости от времени для такого движения. Мы видим, что в момент времени, равный 2 с, направление скорости изменяется. Изменение координаты будет численно равно алгебраической сумме площадей заштрихованных треугольников.

Вычисляя эти площади, мы видим, что изменение координаты равно −6 м, это означает, что в направлении, противоположном оси OX, точка прошла большее расстояние, чем по направлению этой оси.

Важно Площадь **над** осью t берём со знаком «плюс», а площадь **под** осью t, где проекция скорости отрицательна, — со знаком «минус».

Если в начальный момент времени скорость некоторой точки была равна 2 м/с, то координата её в момент времени, равный 6 с, равна −4 м. Модуль перемещения точки в данном случае также равен 6 м — модулю изменения координаты. Однако путь, пройденный этой точкой, равен 10 м — сумме площадей заштрихованных треугольников, показанных на рисунке 1.38.

Изобразим на графике зависимость координаты x точки от времени. Согласно одной из формул (1.14)

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \qquad (1.16)$$

Обсудите с товарищем, может ли график зависимости скорости от времени быть замкнутой кривой, например окружностью.

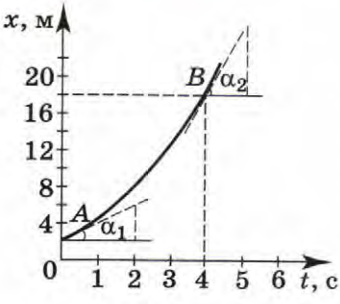


Рис. 1.39

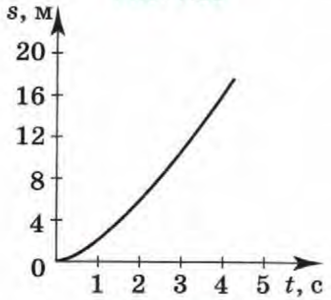


Рис. 1.40

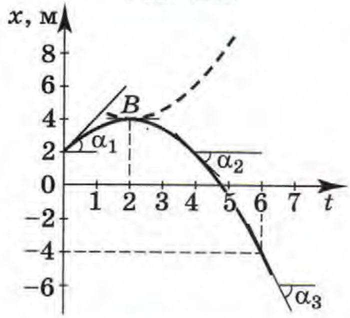


Рис. 1.41

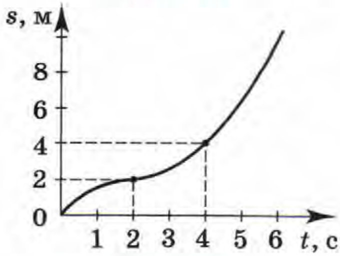


Рис. 1.42

кривая зависимости координаты от времени — $x(t)$ — парабола.

Если движение точки происходит со скоростью, график зависимости которой от времени изображён на рисунке 1.36, то ветви параболы направлены вверх, так как $a_x > 0$ (рис. 1.39). По этому графику мы можем определить координату точки, а также скорость в любой момент времени. Так, в момент времени, равный 4 с, координата точки равна 18 м.

Для начального момента времени, проводя касательную к кривой в точке A, определяем тангенс угла наклона α_1, который численно равен начальной скорости, т. е. 2 м/с.

Для определения скорости в точке B проведём касательную к параболе в этой точке и определим тангенс угла α_2. Он равен 6, следовательно, скорость равна 6 м/с.

График зависимости пути от времени — такая же парабола, но проведённая из начала координат (рис. 1.40). Мы видим, что путь непрерывно увеличивается со временем, движение происходит в одну сторону.

Если движение точки происходит со скоростью, график зависимости проекции которой от времени изображён на рисунке 1.37, то ветви параболы направлены вниз, так как $a_x < 0$ (рис. 1.41). При этом моменту времени, равному 2 с, соответствует вершина параболы. Касательная в точке B параллельна оси t, угол наклона касательной к этой оси равен нулю, и скорость также равна нулю. До этого момента времени тангенс угла наклона касательной уменьшался, но был положителен, движение точки происходило в направлении оси OX.

Начиная с момента времени $t = 2$ с, тангенс угла наклона становится отрицательным, а его модуль увеличивается, это означает, что движение точки происходит в направлении, противоположном начальному, при этом модуль скорости движения увеличивается.

Модуль перемещения равен модулю разности координат точки в конечный и начальный моменты времени и равен 6 м.

График зависимости пройденного точкой пути от времени, показанный на рисунке 1.42 отличается от графика зависимости перемещения от времени (см. рис. 1.41).

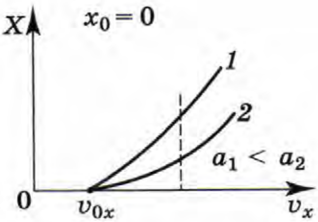


Рис. 1.43

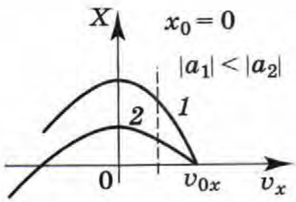


Рис. 1.44

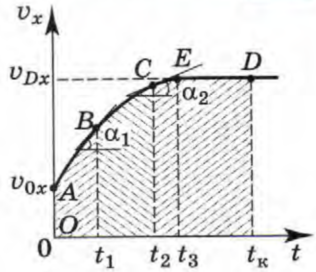


Рис. 1.45

Важно Как бы ни была направлена скорость, путь, пройденный точкой, непрерывно увеличивается.

Выведем зависимость координаты точки от проекции скорости. Скорость $v_x = v_{0x} + a_x t$, отсюда $t = \dfrac{v_x - v_{0x}}{a_x}$. Подставив это выражение в уравнение (1.16), получим

$$x = x_0 + v_{0x}\frac{v_x - v_{0x}}{a_x} + \frac{a_x(v_x - v_{0x})^2}{2a_x^2} = x_0 + \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (1.17)$$

В случае $x_0 = 0$, $a_x > 0$ и $v_x > v_{0x}$ график зависимости координаты от скорости представляет собой параболу (рис. 1.43). При этом, чем больше ускорение, тем ветвь параболы будет менее крутой. Это легко объяснить, так как, чем больше ускорение, тем меньше расстояние, которое должна пройти точка, чтобы скорость увеличилась на то же значение, что и при движении с меньшим ускорением.

В случае $a_x < 0$ и $v_{0x} > 0$ проекция скорости будет уменьшаться. Перепишем уравнение (1.17) в виде $x = \dfrac{v_0^2 - v_x^2}{2a}$, где $a = |a_x|$. График этой зависимости — парабола с ветвями, направленными вниз (рис. 1.44).

Ускоренное движение. По графикам зависимости проекции скорости от времени можно определить координату и проекцию ускорения точки в любой момент времени при любом типе движения.

Пусть проекция скорости точки зависит от времени так, как показано на рисунке 1.45. Очевидно, что в промежутке времени от 0 до t_3 движение точки вдоль оси X происходило с переменным ускорением. Начиная с момента времени, равного t_3, движение равномерное с постоянной скоростью v_{Dx}. По графику мы видим, что ускорение, с которым двигалась точка, непрерывно уменьшалось (сравните угол наклона касательной в точках B и C).

Изменение координаты x точки за время t_1 численно равно площади криволинейной трапеции $OABt_1$, за время t_2 — площади $OACt_2$ и т. д. Как видим по графику зависимости проекции скорости от времени можно определить изменение координаты тела за любой промежуток времени.

По графику зависимости координаты от времени можно определить

> Постройте график зависимости ускорения точки от времени, если $v_x = 2t^2$.

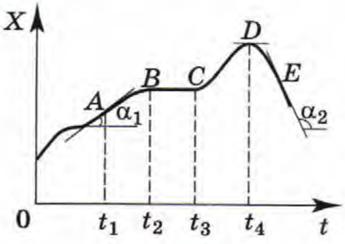


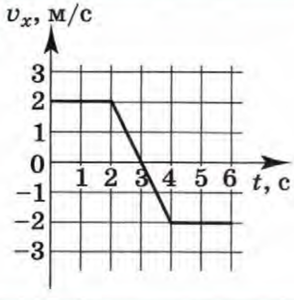
Рис. 1.46

значение скорости в любой момент времени, вычисляя тангенс угла наклона касательной к кривой в точке, соответствующей данному моменту времени. Из рисунка 1.46 следует, что в момент времени t_1 проекция скорости положительна. В промежутке времени от t_2 до t_3 скорость равна нулю, тело неподвижно. В момент времени t_4 скорость также равна нулю (касательная к кривой в точке D параллельна оси абсцисс). Затем проекция скорости становится отрицательной, направление движения точки изменяется на противоположное.

Важно Если известен график зависимости проекции скорости от времени, можно определить ускорение точки, а также, зная начальное положение, определить координату тела в любой момент времени, т. е. решить основную задачу кинематики. По графику зависимости координаты от времени можно определить одну из самых важных кинематических характеристик движения — скорость. Кроме этого, по указанным графикам можно определить тип движения вдоль выбранной оси: равномерное, с постоянным ускорением или движение с переменным ускорением.

Графики зависимости кинематических характеристик — Найти

1. Как по графику зависимости проекции скорости от времени определить: 1) модуль перемещения; 2) путь, пройденный точкой?
2. Может ли путь быть отрицательным?
3. Как по графику зависимости координаты от времени определить проекции скорости в разные моменты времени?
4. Можно ли сказать, что при равнозамедленном движении, чем больше время, тем меньше скорость тела?



А1. На графике изображена зависимость проекции скорости точки, движущейся вдоль оси OX, от времени. Чему равен модуль перемещения точки к моменту времени $t = 6$ с?

1) 0 2) 6 м 3) 8 м 4) 10 м

А2. Какой путь прошла точка за 6 с (см. рис.)?

1) 0 2) 6 м 3) 8 м 4) 10 м

А3. Проекция ускорения (см. рис.) на ось X в интервалах времени (0, 2); (2, 4) и (4, 6) с была равна

1) 1; −2; 0
2) 1; −1; −1
3) 0; −2; 0
4) 0; 2; 0

§ 12 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ»

Для решения задач по этой теме необходимо правильно записывать уравнение движения и уравнение зависимости скорости от времени.

Для некоторых задач разумно строить графики зависимости проекции скорости от времени и определять перемещение по графику, что часто удобнее, чем решать задачу аналитически.

Задача 1. Ударом клюшки хоккейной шайбе сообщили скорость $v_0 = 20$ м/с. Через время $t = 2$ с скорость шайбы, движущейся прямолинейно, стала равна 16 м/с. Определите ускорение шайбы, считая его постоянным.

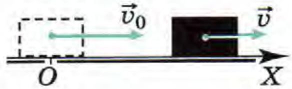


Рис. 1.47

Р е ш е н и е. Выберем оси координат так, чтобы движение шайбы происходило вдоль какой-нибудь координатной оси, например вдоль оси OX. За положительное направление оси OX примем направление вектора начальной скорости (рис. 1.47). Из определения ускорения следует: $a_x = (v - v_0)/t = -2$ м/с^2.

Знак «–» в конечном результате означает, что вектор ускорения направлен в сторону, противоположную положительному направлению оси OX. Модуль же ускорения $a = |a_x| = |-2 \text{ м/с}^2| = 2$ м/с^2.

Задача 2. Перекрытие между первым и вторым этажами здания лифт проходил со скоростью $v_0 = 4$ м/с. Далее он начал тормозить и поднимался с постоянным ускорением $a = 2$ м/с^2. Через время $t = 2$ с после начала торможения лифт остановился. Высота h каждого этажа равна 4 м. На какой высоте H, считая от пола первого этажа, остановился лифт?

Р е ш е н и е. Совместим начало координат с полом первого этажа и направим ось OY вертикально вверх. Так как ускорение лифта постоянно, то его движение будет описываться кинематическим уравнением $y = y_0 + v_{0y}t + a_yt^2/2$.

Согласно условию задачи $y_0 = h$, $v_{0y} = v_0$, $a_y = -a$, $y = H$.

Поэтому $H = h + v_0t - at^2/2$; $H = 8$ м.

Задача 3. На рисунке 1.48 изображена зависимость проекции скорости от времени.

1) Постройте графики зависимости ускорения и перемещения от времени.

2) Определите перемещение за время, равное t_3.

3) Определите среднюю скорость движения за время, равное t_3.

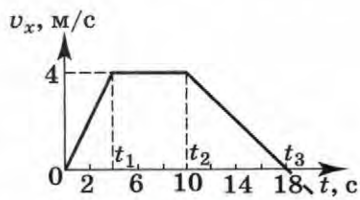


Рис. 1.48

Р е ш е н и е. В течение промежутка времени от 0 до t_1 материальная точка движется равноускоренно, так как скорость растёт со временем по линейному закону. Ускорение $a_{1x} = (v_1 - 0)/t_1 = 1$ м/с^2.

В течение промежутка времени $\Delta t = t_2 - t_1$ материальная точка движется равномерно: $v = v_1 = \text{const}$, $a_2 = 0$. При $t > t_2$ точка движется равнозамедленно с ускорением $a_{3x} = (0 - v_1)/(t_3 - t_2) = -0{,}5$ м/с^2.

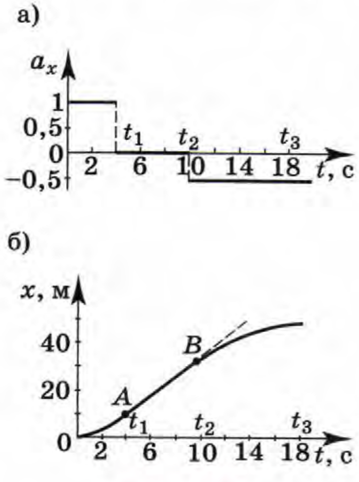


Рис. 1.49

На рисунке 1.49, *а* изображён график зависимости a_x от t. Зависимость $x(t)$ в интервале $0 < t < t_1$ определяется по формуле $x = 0 + a_{1x}t^2/2$ и при $t = t_1$ $x_1 = a_{1x}t_1^2/2 = 8$ м. Скорость в момент времени t_1 будет равна v_1, и тело начнёт двигаться равномерно:

$$x_2 = x_1 + v_{1x}(t_2 - t_1) = 32 \text{ м}.$$

Начиная с $t = t_2$ тело движется равнозамедленно:

$$x_3 = x_2 + v_{1x}(t_3 - t_2) - a_{3x}(t_3 - t_2)^2/2 = 48 \text{ м}.$$

Средняя скорость движения

$$v_{\text{ср}} = x_3/t_3 \approx 2{,}7 \text{ м/с}.$$

График зависимости $x(t)$ показан на рисунке 1.49, *б*. Кривая, изображающая зависимость $x(t)$, состоит из трёх участков: параболы, прямой, параболы. Отметим, что парабола плавно переходит в прямую в точке A (и в точке B), так как значение мгновенной скорости определяется тангенсом угла наклона касательной к графику $x(t)$ и в каждой точке графика должна быть единственная касательная. Перемещение также можно определить как площадь трапеции (см. рис. 1.48):

$$x_3 = v_{1x}t_1/2 + v_{1x}(t_2 - t_1) + v_{1x}(t_3 - t_2)/2 = 48 \text{ м}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Тело движется вдоль координатной оси OX. Направления начальной скорости и ускорения совпадают с положительным направлением оси, а их модули равны $v_0 = 4$ м/с, $a = 2$ м/с^2. Определите скорость через 4 с от начала отсчёта времени.

2. В точке с координатой $x_0 = 10$ м тело имело скорость $v_0 = 20$ м/с, направленную противоположно положительному направлению оси OX. Ускорение тела направлено противоположно вектору начальной скорости, а его модуль равен 10 м/с^2. Определите координату тела в моменты времени 1, 2, 3, 4 с от начала отсчёта.

Рис. 1.50

3. На рисунке 1.50 показан график зависимости проекции скорости тела от времени. Постройте график зависимости модуля перемещения от времени.

§ 13 ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Что называют свободным падением?
От чего свободно падающее тело?

При изучении свободного падения тел мы будем рассматривать только такие движения, при которых ускорение свободного падения постоянно, т. е. сопротивление воздуха можно не учитывать.

Эти движения будут описываться известными нам кинематическими уравнениями (1.12) и (1.14).

С движением тел, получивших начальную скорость под углом к ускорению свободного падения или под углом к горизонту, приходится встречаться довольно часто. Например: снаряд, выпущенный под углом к горизонту; ядро, которое толкнул спортсмен.

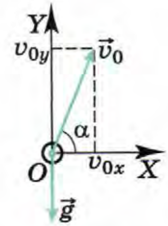


Рис. 1.51

Найдём траекторию тела, брошенного под углом к горизонту. Пусть из точки O брошено тело с начальной скоростью $\vec{v}_0$ под углом α к горизонту (рис. 1.51). Выберем оси координат так, чтобы векторы $\vec{v}_0$ и $\vec{g}$ были расположены в какой-либо координатной плоскости, например в плоскости XOY. Ось OX направим горизонтально, а ось OY — вертикально вверх. Начало координат выберем в точке бросания.

Так как ускорение свободного падения с течением времени не меняется, то движение тела в данном случае, как и любое движение с постоянным ускорением, можно описать уравнениями

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \qquad (1.18)$$

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \qquad (1.19)$$

Так как в начальный момент времени тело находилось в начале координат, то $x_0 = 0$ и $y_0 = 0$. Проекцию вектора на какую-либо ось можно выразить через модуль вектора и косинус или синус угла, который этот вектор образует с положительным направлением оси. Из рисунка 1.51 видно, что $v_{0x} = v_0\cos\alpha$, $v_{0y} = v_0\sin\alpha$, $a_x = 0$ и $a_y = -g$. Поэтому уравнения (1.18) и (1.19) можно записать в виде

$$x = (v_0\cos\alpha)\,t, \qquad (1.20)$$

$$y = (v_0\sin\alpha)\,t - \frac{gt^2}{2}. \qquad (1.21)$$

Для построения траектории точки можно найти из уравнений (1.20) и (1.21) значения координат x и y для различных моментов времени, а затем по координатам построить точки и соединить их плавной линией.

Приведите ещё примеры ситуаций, в которых тело начинает падать с начальной скоростью, направленной под углом к горизонту.

Однако удобнее найти уравнение траектории, т. е. зависимость y от x. Чтобы получить это уравнение, нужно исключить время из уравнений (1.20) и (1.21).

Из уравнения (1.20) имеем $t = \dfrac{x}{v_0 \cos\alpha}$. Следовательно,

$$y = x\frac{v_0 \sin\alpha}{v_0 \cos\alpha} - \frac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha} = x\operatorname{tg}\alpha - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2.$$

Введём обозначения: $\operatorname{tg}\alpha = c$ и $-\dfrac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha} = b$. Тогда

$$y = bx^2 + cx. \qquad (1.22)$$

Используя значения $b = -0{,}2$ м$^{-1}$ и $c = 1{,}6$, вычислите начальную скорость v_0 и угол α, под которым брошено тело.

Из курса алгебры известно, что графиком функции (1.22) является парабола, ось симметрии которой — прямая, параллельная оси Y. Поскольку в данном случае $b < 0$, то ветви параболы направлены вниз. На рисунке 1.52 изображена парабола для случая $b = -0{,}2$ м$^{-1}$ и $c = 1{,}6$.

Итак, мы доказали, что если ускорение свободного падения постоянно, то тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе. Теперь определим дальность и максимальную высоту полёта тела.

Определите углы, при которых дальность и высота полёта будут максимальны, а также угол, при котором высота полёта будет равна дальности.

Дальность полёта

$$L = (v_0\cos\alpha)t_{\text{пол}}. \qquad (1.23)$$

Время полёта можно определить из уравнения (1.21). При падении тела $y = 0$, отсюда $t_{\text{пол}} = \dfrac{2v_0\sin\alpha}{g}$.

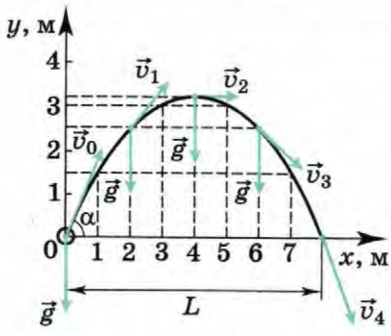


Рис. 1.52

Подставив это выражение в уравнение (1.23), получим $L = v_0\cos\alpha\dfrac{2v_0\sin\alpha}{g} = \dfrac{v_0^2\sin 2\alpha}{g}$.

Время подъёма $t_{\text{под}} = \dfrac{t_{\text{пол}}}{2} = \dfrac{v_0\sin\alpha}{g}$. Подставив это выражение в уравнение (1.21), получим $h = \dfrac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}$.

Из формул (1.20) и (1.21) видно, что движение тела, брошенного под углом к горизонту, можно рассматривать как сумму двух независимых движений — равномерного движения вдоль оси OX и равноускоренного движения вдоль оси OY.

Закон независимости движений Всякое сложное движение можно представить как сумму движений по двум независимым координатам.

Теперь выясним, какой будет траектория тела, если его начальная скорость направлена горизонтально.

Из рисунка 1.52 видно, что, начиная с того момента, когда скорость тела горизонтальна, оно движется по ветви параболы. Следовательно, любое тело, брошенное горизонтально, будет двигаться по одной из ветвей параболы, вершина которой находится в точке бросания (рис. 1.53).

Мы разобрали пример сложного движения тела. Это движение является суммой двух независимых движений — равномерного движения со скоростью $\vec{v_0}$ и равноускоренного движения с ускорением $\vec{g}$. Используя закон независимости движения, можно определить параметры траектории, а также значения кинематических характеристик движения в разные моменты времени.

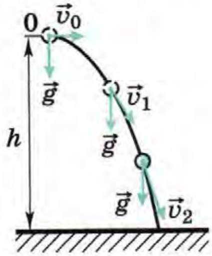


Рис. 1.53

Напишите уравнения движения тела в случае, если тело бросают горизонтально с высоты h. Сравните свои уравнения с уравнениями, написанными соседом по парте.

Интересно

Наглядное представление о траектории тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, можно получить на простом опыте. Так как каждая частица воды движется по параболе, то струи воды имеют форму параболы. В этом легко убедиться, поставив за струёй экран с заранее вычерченной параболой. При определённой скорости истечения воды струя будет располагаться вдоль вычерченной параболы.

Ускорение свободного падения. Независимость движений Найти

1. Какую форму имеет траектория тела, брошенного под углом к горизонту?
2. При каком угле бросания дальность полёта будет максимальна?
3. Под каким углом к горизонту направлена скорость тела в наивысшей и конечной точках траектории?

С1. Камень, брошенный горизонтально, упал на землю через 2 с. Определите высоту, с которой был брошен камень (g = 10 м/с^2).

С2. Мяч бросили с горизонтальной поверхности земли под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. Максимальная скорость мяча во время полёта была равна 12 м/с. Чему равна минимальная скорость мяча во время полёта?

С3. Небольшой камень, брошенный с ровной горизонтальной поверхности земли под углом к горизонту, упал обратно на землю в 20 м от места броска. Сколько времени прошло от броска до того момента, когда его скорость была направлена горизонтально и равна 10 м/с?

§ 14 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ДВИЖЕНИЕ С ПОСТОЯННЫМ УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ»

При решении задач по этой теме надо иметь в виду, что свободное падение — частный случай движения тела с постоянным ускорением. Если тело брошено под углом к горизонту, отличным от 90°, то движение происходит в плоскости, при этом надо помнить, что в горизонтальном направлении движение равномерное, так как проекция ускорения на эту ось равна нулю.

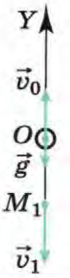


Рис. 1.54

Задача 1. С балкона из точки O бросили мяч вертикально вверх со скоростью $v_0 = 9$ м/с. Определите положение мяча относительно точки O и его скорость спустя время $t_1 = 2$ с от момента бросания. Сопротивление воздуха не учитывайте.

Решение. Поскольку сопротивление воздуха не учитывается, то движение мяча можно считать свободным падением. В данном случае векторы $\vec{v_0}$ и $\vec{g}$ лежат на одной прямой. Следовательно, мяч будет двигаться вдоль той же прямой. Примем за начало координат точку O бросания мяча, ось Y направим вертикально вверх (рис. 1.54). Тогда движение мяча будет описываться кинематическим уравнением

$$y = y_0 + v_{oy}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

Так как $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0$ и $a_y = -g$, то $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$. В момент времени $t_1 = 2$ с

$$y = 9\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2\text{с} - \frac{9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4\text{с}^2}{2} = -1{,}6 \text{ м}.$$

Чтобы определить модуль и направление вектора скорости $\vec{v_1}$, найдём его проекцию на ось Y по формуле $v_y = v_{0y} + a_y t$. При выбранном направлении оси Y последнюю формулу можно записать так: $v_y = v_0 - gt$. Поэтому

$$v_{1y} = 9\,\frac{\text{м}}{\text{с}} - 9{,}8\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 2\text{с} = -10{,}6\,\frac{\text{м}}{\text{с}};\ |v_{1y}| = v_1 = 10{,}6\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 11\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Отрицательный знак проекции скорости означает, что в конце второй секунды скорость мяча направлена противоположно положительному направлению оси Y, т. е. вниз.

Задача 2. Из точки A брошен горизонтально шарик со скоростью $v_0 = 8$ м/с. Определите положение шарика относительно точки O через $t = 1{,}5$ с от начала его движения. Точки A и O находятся на одной вертикали на расстоянии 5 м друг от друга и точка O ниже точки A. Сопротивлением воздуха можно пренебречь.

Решение. Выберем оси координат так, чтобы векторы $\vec{v_0}$ и $\vec{g}$ лежали в одной координатной плоскости, например в плоскости XOY. Так как сопротивление воздуха не учитывается и начальная скорость шарика направлена горизонтально, то он будет двигаться в плоскости XOY по параболе, вершина которой находится в точке бросания. Поскольку надо найти положение шарика относительно точки O, то за начало координат возьмём эту точку. Ось OX направим горизонтально, ось OY — вертикально вверх (рис. 1.55).

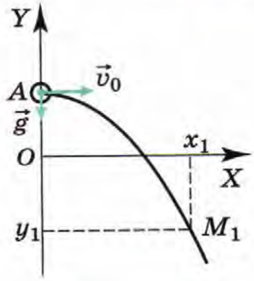


Рис. 1.55

В этом случае движение шарика будет описываться кинематическими уравнениями

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

При сделанном выборе начала координат и направлений осей OX и OY имеем $x_0 = 0$, $y_0 = |OA|$, $v_{0x} = v_0$, $v_{0y} = 0$, $a_x = 0$, $a_y = -g$. Поэтому $x = v_0 t$, $y = |OA| - \frac{gt^2}{2}$. Спустя время $t_1 = 1{,}5$ с координаты шарика будут равны:

$$x_1 = 8\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1{,}5\,\text{с} = 12\,\text{м}, \quad y_1 = 5\,\text{м} - \frac{9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 2{,}25\,\text{с}^2}{2} \approx -6\,\text{м}.$$

Задача 3. Футболист, находясь от ворот на расстоянии l, ударяет по мячу, и мяч летит с начальной скоростью v_0 и пролетает мимо, едва коснувшись верхней планки ворот. Высота ворот h. Определите, под каким углом начал лететь мяч, после того как футболист ударил по нему.

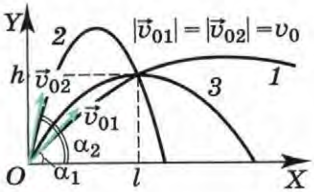


Рис. 1.56

Решение. Выбрав систему координат так, как показано на рисунке 1.56, и начало координат в точке удара по мячу, отметим, что координаты мяча в момент касания верхней планки ворот будут

$$x = l,\ y = h.$$

Запишем уравнения движения мяча вдоль осей OX и OY:

$$x = (v_0\cos\alpha)t;$$
$$y = (v_0\sin\alpha)t - gt^2/2.$$

Выразив из первого уравнения время и подставив его во второе, получим

$$y = x\,\text{tg}\alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}.$$

Тогда у верхней планки ворот $h = l\,\text{tg}\alpha - \frac{gl^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}$. Мы получили тригонометрическое уравнение. Произведя замену $1/(\cos^2\alpha) = 1 + \text{tg}^2\alpha$ и выполнив необходимые преобразования, получим квадратное уравнение относительно $\text{tg}\alpha$:

$$\frac{gl^2}{2v_0^2}\,\text{tg}^2\alpha - l\,\text{tg}\alpha + \left(h + \frac{gl^2}{2v_0^2}\right) = 0.$$

Решив его, найдём $(\text{tg}\alpha)_{1,2} = \dfrac{1 \pm \sqrt{1 - (2g/v_0^2)(h + (gl^2/2v_0^2))}}{gl/v_0^2}$.

Тогда значения угла $\alpha_{1,2} = \text{arctg}\left(\dfrac{1 \pm \sqrt{1 - (2g/v_0^2)(h + (gl^2/2v_0^2))}}{gl/v_0^2}\right)$.

Оба значения имеют смысл. Кроме этого, если $(g/v_0^2)(h + gl^2/2v_0^2) = 1/2$, то мяч касается планки в наивысшей точки траектории. На рисунке 1.56 показаны три возможные траектории полёта мяча.

Задачи для самостоятельного решения.

1. Камень, упав с обрыва, достиг поверхности воды через 2 с. Чему равна высота обрыва? Определите модуль конечной скорости камня.

2. Льдинка падает с высоты 4 м. Определите время, за которое она пролетела последний метр, а также среднюю скорость её движения.

3. Камень брошен горизонтально со скоростью 20 м/с с высоты 10 м относительно земли. Определите время полёта, дальность полёта и скорость камня в момент падения на землю.

4. Мяч брошен с поверхности земли под углом 45° к горизонту со скоростью 20 м/с. Определите наибольшую высоту подъёма, дальность полёта, скорость в наивысшей точке траектории, скорость и координаты мяча через 2 с после начала движения.

В1. Камень падает из состояния покоя с высоты h. Ось OY вертикальна и направлена вверх. Начало координат совпадает с поверхностью земли.
Установите соответствие между физическими величинами и формулами, определяющими их. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Физическая величина	Формула
А) Проекция скорости на ось OY в момент времени t	1) gt 2) $h - gt^2/2$ 3) $-gt$ 4) $gt^2/2$
Б) Координата точки, в которой находится камень в момент времени t	

А)	Б)

В2. Тело брошено со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Начало координат находится в точке, из которой брошено тело, ось OX горизонтальна, ось OY вертикальна и направлена вверх.
Установите соответствие между физическими величинами и формулами, определяющими их. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Физическая величина	Формула
А) Максимальное значение нормального ускорения во время полёта	1) g 2) $-v_0$ 3) $g\cos\alpha$ 4) $-v_0\sin\alpha$
Б) Минимальное значение проекции скорости v_y.	

А)	Б)

§ 15 РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ

Изменяется ли скорость точки при её равномерном движении по окружности? Может ли материальная точка двигаться по криволинейной траектории без ускорения?

Рассмотрим равномерное движение точки по окружности. Очевидно, что в этом случае скорость и ускорение не изменяются по модулю, а изменяются лишь по направлению.

Интересно

Движение тела по окружности или дуге окружности довольно часто встречается в природе и технике. Приблизительно по окружности движется Луна вокруг Земли; каждая точка земной поверхности движется по окружности вокруг земной оси; дуги окружности описывают различные точки самолёта во время виража, автомобиля при повороте, поезда на закруглении дороги и т. д.

Приведите примеры движения тел по окружности, которые вы наблюдаете в повседневной жизни.

Найдём модуль и направление вектора ускорения при равномерном движении точки по окружности радиусом R. Пусть точка в момент времени t занимает положение M, а через интервал времени Δt — положение M_1 (рис. 1.57). Обозначим её скорость в положении M через $\vec{v}$, а в положении M_1 через $\vec{v}_1$. При равномерном движении $v = v_1$. Чтобы найти изменение скорости $\Delta\vec{v}$ за время Δt, надо из вектора $\vec{v}_1$ вычесть вектор $\vec{v}$. Разделив вектор $\Delta\vec{v}$ на промежуток времени Δt, получим среднее ускорение точки за этот промежуток времени:

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

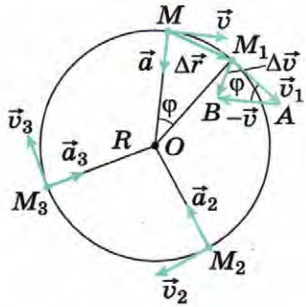


Рис. 1.57

Сначала найдём модуль мгновенного ускорения. Для этого проведём вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ и рассмотрим треугольники OMM_1 и M_1AB. Эти треугольники подобны как равнобедренные с равными углами при вершинах (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно, $\frac{|\Delta\vec{v}|}{v} = \frac{|\Delta\vec{r}|}{R}$.

Разделив левую и правую части этого равенства на промежуток времени Δt, получим $\frac{1}{v}\frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t} = \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}\frac{1}{R}$, или

$$\frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t} = \frac{v}{R}\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}. \qquad (1.24)$$

Но

$$\frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t} = a_{ср} \text{ и } \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t} = v_{ср}.$$

Обсудите с товарищем, как изменится среднее ускорение, если рассматривать такие случаи: 1) точка прошла четверть оборота; 2) точка прошла пол-оборота; 3) точка сделала полный оборот.

В пределе, т. е. при стремлении промежутка времени Δt к нулю, модуль вектора $\frac{|\Delta\vec{v}|}{\Delta t}$ будет модулем ускорения $|\vec{a}|$ точки в момент времени t, а модуль вектора $\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}$ будет представлять собой модуль вектора мгновенной скорости $|\vec{v}|$. Тогда равенство (1.24) примет вид

$$\boxed{a = \frac{v^2}{R}.} \tag{1.25}$$

Так как v и R постоянны, то модуль вектора ускорения при равномерном движении точки по окружности остаётся всё время неизменным.

Как вы думаете, с одинаковыми ли по модулю скоростями и ускорениями движутся все точки кабинки колеса обозрения?

Понаблюдайте за колебаниями шарика на нити. Изменяется ли центростремительное ускорение шарика при его движении?

Интересно Иногда центростремительное ускорение называют нормальным ускорением. Это название связано с тем, что центростремительное ускорение направлено по нормали к скорости тела.

Найдём теперь направление ускорения $\vec{a}$. Вектор ускорения направлен так, как направлен вектор $\Delta\vec{v}$ в пределе при стремлении промежутка времени Δt к нулю. Из рисунка 1.57 видно, что при стремлении интервала Δt к нулю точка M_1 приближается к точке M и угол φ стремится к нулю. Следовательно, угол BM_1A стремится к 90°. Таким образом, угол между вектором $\Delta\vec{v}$ и радиусом окружности стремится к нулю. Следовательно, в пределе вектор мгновенного ускорения направлен к центру окружности. Поэтому ускорение точки при её равномерном движении по окружности называют *центростремительным*.

Важно В процессе движения точки по окружности ускорение всё время направлено по радиусу к центру, т. е. непрерывно изменяется по направлению. Следовательно, равномерное движение точки по окружности является движением с переменным ускорением и переменной скоростью. Отметим, что модули скорости и ускорения при этом остаются постоянными.

Криволинейное движение. Центростремительное ускорение Найти

1. Точка движется равномерно по окружности. Постоянна ли её скорость?
2. Постоянно ли ускорение при равномерном движении точки по окружности?
3. Куда направлено ускорение конца стрелки часов? Будет ли ускорение перпендикулярно мгновенной скорости?
4. Какое ускорение всегда перпендикулярно мгновенной скорости?

§ 16 КИНЕМАТИКА АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА

При любом ли движении тела можно использовать такую его модель, как материальная точка?
Какие модели тела ещё существуют?

Поступательное движение твёрдого тела. Описание движения тела считается полным лишь тогда, когда известно, как движется каждая его точка.

Мы много внимания уделили описанию движения точки. Именно для точки вводятся понятия координат, скорости, ускорения, траектории. В общем случае задача описания движения тел является сложной. Особенно она сложна, если тела заметно деформируются в процессе движения. Проще описать движение тела, взаимное расположение частей которого не изменяется.

Запомни Тело, расстояние между любыми двумя точками которого остаётся постоянным при его движении, называется **абсолютно твёрдым**.

Абсолютно твёрдое тело — это одна из механических моделей, используемых при описании движения и взаимодействия тел.

На самом деле абсолютно твёрдых тел нет. Но в тех случаях, когда реальные тела при движении мало деформируются, их можно рассматривать как абсолютно твёрдые. Однако и движение абсолютно твёрдого тела в общем случае оказывается весьма сложным. Самое простое движение абсолютно твёрдых тел — *поступательное.*

Запомни **Поступательным** называется такое движение абсолютно твёрдого тела, при котором любой отрезок, соединяющий любые две точки тела, остаётся параллельным самому себе.

При поступательном движении все точки тела совершают одинаковые перемещения, описывают одинаковые траектории, проходят одинаковые пути, имеют в каждый момент времени равные скорости и ускорения. Покажем это.

Пусть тело движется поступательно (рис. 1.58). Соединим две его произвольные точки B и A отрезком. Расстояние $|AB|$ не изменяется, так как тело абсолютно твёрдое. При поступательном движении остаются постоянными модуль и направление вектора $\overrightarrow{AB}$. Вследствие этого траектории точек B и A одинаковы, так как они могут быть полностью совмещены параллельным переносом на вектор $\overrightarrow{AB}$.

Согласно рисунку 1.58 перемещения точек A и B одинаковы и совершаются за одно и то же время. Очевидно, что любая точка твёрдого тела, например C, движется так же, как точки A и B.

Следовательно, точки A и B имеют одинаковые скорости и ускорения.

Совершенно очевидно, что для описания поступательного движения абсолютно твёрдого тела достаточно описать движение какой-либо одной его точки.

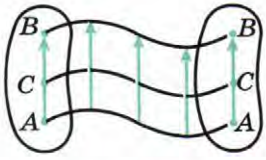


Рис. 1.58

Рис. 1.59

Рис. 1.60

Важно Лишь при поступательном движении можно говорить о скорости и ускорении тела.

В каком случае движение ручки, которой вы пишете, можно считать поступательным?

Примерно поступательно движутся ящик письменного стола, поршни двигателя автомобиля относительно цилиндров, вагоны на прямолинейном участке железной дороги, резец токарного станка относительно станины. Движение педали велосипеда или кабины колеса обозрения в парках (рис. 1.59, 1.60) — также примеры поступательного движения.

Важно Для описания поступательного движения абсолютно твёрдого тела достаточно написать уравнение движения одной из его точек.

Вращательное движение абсолютно твёрдого тела. Вращательное движение вокруг неподвижной оси — ещё один частный случай движения твёрдого тела.

В технике такой вид движения встречается очень часто: например, вращение валов двигателей и генераторов, турбин и пропеллеров самолётов.

Запомни **Вращательным движением** абсолютно твёрдого тела вокруг неподвижной оси называется такое его движение, при котором все точки тела описывают окружности, центры которых находятся на одной прямой, называемой осью вращения, при этом плоскости, которым принадлежат эти окружности, перпендикулярны оси вращения (рис. 1.61).

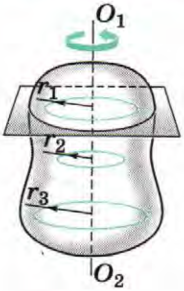


Рис. 1.61

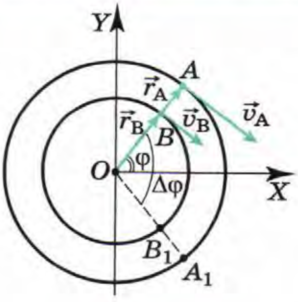


Рис. 1.62

Угловая скорость. Каждая точка тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, проходящей через точку O, движется по окружности, и различные точки проходят за время Δt разные пути. Так, $AA_1 > BB_1$ (рис. 1.62), поэтому модуль скорости точки A больше, чем модуль скорости точки B. Но радиус-векторы, определяющие положение точек A и B, поворачиваются за время Δt на один и тот же угол $\Delta\varphi$.

Угол φ — угол между осью OX и радиус-вектором $\vec{r}$, определяющим положение точки A (см. рис. 1.62).

Понаблюдайте за движением велосипеда. Сравните угловые скорости педали, какой-либо точки цепи при её движении по окружности и колеса.

Пусть тело вращается равномерно, т. е. за любые равные промежутки времени радиус-векторы поворачиваются на одинаковые углы.

Чем больше угол поворота радиус-вектора, определяющего положение какой-то точки твёрдого тела, за определённый промежуток времени, тем быстрее вращается тело и тем больше его угловая скорость.

Запомни **Угловой скоростью тела при равномерном вращении** называется величина, равная отношению угла поворота тела $\Delta\varphi$ к промежутку времени Δt, за который этот поворот произошёл.

Будем обозначать угловую скорость греческой буквой ω (омега). Тогда по определению

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \qquad (1.26)$$

Угловая скорость в СИ выражается в радианах в секунду (рад/с).

Например, угловая скорость вращения Земли вокруг оси равна 0,0000727 рад/с, а точильного диска — около 140 рад/с.

Как приближённо посчитать угловую скорость вращения Земли вокруг Солнца?

Угловую скорость можно связать с частотой вращения.

Запомни **Частота вращения** — число полных оборотов за единицу времени (в СИ за 1 с).

Если тело совершает ν (греческая буква «ню») оборотов за 1 с, то время одного оборота равно $1/\nu$ секунд.

Запомни Время, за которое тело совершает один полный оборот, называют **периодом вращения** и обозначают буквой T.

Таким образом, связь между частотой и периодом вращения можно представить в виде

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

Полному обороту тела соответствует угол $\Delta\varphi = 2\pi$. Поэтому согласно формуле (1.26)

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.} \qquad (1.27)$$

Интересно Радиан равен центральному углу, опирающемуся на дугу, длина которой равна радиусу окружности, 1 рад = 57°17′48″. В радианной мере угол равен отношению длины дуги окружности к её радиусу: $\varphi = l/R$.

Если при равномерном вращении угловая скорость известна и в начальный момент времени $t_0 = 0$ угол $\varphi_0 = 0$, то угол поворота радиус-вектора за время t согласно уравнению (1.26)

$$\varphi = \omega t.$$

Если $\varphi_0 \neq 0$, то $\varphi - \varphi_0 = \omega t$, или $\varphi = \varphi_0 \pm \omega t$.

Положительна или отрицательна угловая скорость стрелок часов, вращения колеса обозрения (см. рис. 1.60), колёс автомобиля при движении?

Угловая скорость принимает положительные значения, если угол между радиус-вектором, определяющим положение одной из точек твёрдого тела, и осью OX увеличивается (рис. 1.63, *а*), и отрицательные, когда он уменьшается (рис. 1.63, *б*).

Тем самым мы можем найти положение точек вращающегося тела в любой момент времени.

Связь между линейной и угловой скоростями. Скорость точки, движущейся по окружности, часто называют *линейной скоростью*, чтобы подчеркнуть её отличие от угловой скорости.

Мы уже отмечали, что

Важно при вращении абсолютно твёрдого тела разные его точки имеют неодинаковые линейные скорости, но угловая скорость для всех точек одинакова.

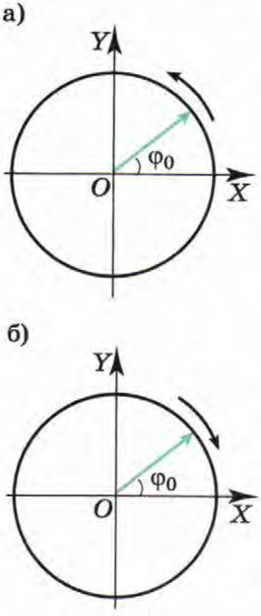


Рис. 1.63

Установим связь между линейной скоростью любой точки вращающегося тела и его угловой скоростью. Точка, лежащая на окружности радиусом R, за один оборот пройдёт путь $2\pi R$. Поскольку время одного оборота тела есть период T, то модуль линейной скорости точки можно найти так:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu. \qquad (1.28)$$

Так как $\omega = 2\pi\nu$, то

$$\boxed{v = \omega R.} \qquad (1.29)$$

Из этой формулы видно, что, чем дальше расположена точка тела от оси вращения, тем больше её линейная скорость. Для точек земного экватора $v = 463$ м/с, а для точек на широте Санкт-Петербурга $v = 233$ м/с. На полюсах Земли $v = 0$.

Модуль центростремительного ускорения точки тела, движущейся равномерно по окружности, можно выразить через угловую скорость тела и радиус окружности:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R}, \quad v = \omega R.$$

Следовательно,

$$a_{цс} = \omega^2 R.$$

Запишем все возможные расчётные формулы для центростремительного ускорения:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2}R = 4\pi^2\nu^2 R.$$

Почему при быстром вращении велосипедного колеса мы видим отдельные спицы только около оси вращения?

Мы рассмотрели два простейших движения абсолютно твёрдого тела — поступательное и вращательное. Однако любое сложное движение абсолютно твёрдого тела можно представить как сумму двух независимых движений: поступательного и вращательного.

На основании закона независимости движений можно описать сложное движение абсолютно твёрдого тела.

Твёрдое тело. Поступательное, вращательное движения Найти

?

1. В каком случае тело можно считать абсолютно твёрдым?
2. Что называется поступательным движением?
3. Приведите примеры поступательного движения, не упомянутые в тексте книги.
4. Что называется осью вращения твёрдого тела?
5. Что такое угловая скорость?
6. Во сколько раз угловая скорость минутной стрелки часов больше угловой скорости часовой стрелки?

ЕГЭ

А1. Период обращения тела, движущегося равномерно по окружности, увеличился в 2 раза. При этом частота обращения

1) возросла в 2 раза
2) уменьшилась в 2 раза
3) возросла в 4 раза
4) уменьшилась в 4 раза

А2. Материальная точка, двигаясь равномерно по окружности, за 3 с прошла четверть окружности. Определите частоту обращения точки.

1) $\frac{1}{12}$ с$^{-1}$ 2) $\frac{1}{3}$ с$^{-1}$ 3) $\frac{1}{4}$ с$^{-1}$ 4) $\frac{1}{2}$ с$^{-1}$

А3. Автомобиль движется по закруглению дороги радиусом 20 м с центростремительным ускорением 5 м/с^2. Скорость автомобиля равна

1) 12,5 м/с 2) 10 м/с 3) 5 м/с 4) 4 м/с

А4. Материальная точка движется по окружности с постоянной по модулю скоростью. Как изменится модуль её центростремительного ускорения, если скорость точки увеличить втрое?

1) увеличится в 3 раза
2) увеличится в 9 раз
3) уменьшится в 3 раза
4) уменьшится в 9 раз

§ 17 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «КИНЕМАТИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

При решении задач по этой теме обращайте внимание на связь кинематических характеристик поступательного и вращательного движений. При этом могут быть в одних случаях одинаковыми угловые скорости (например, задача 2), а в других — линейные скорости движения (например, задача 1).

Задача 1. Два шкива соединены ременной передачей, передающей вращение от одного шкива к другому. Ведущий шкив вращается с частотой $\nu_1 = 3000$ об/мин, ведомый шкив — с частотой $\nu_2 = 600$ об/мин. Ведомый шкив имеет диаметр $D_2 = 500$ мм. Какой диаметр D_1 у ведущего шкива?

Р е ш е н и е. Ведущий шкив вращается с угловой скоростью $\omega_1 = 2\pi\nu_1$, а ведомый — со скоростью $\omega_2 = 2\pi\nu_2$. Скорость приводного ремня равна линейной скорости точек окружностей того и другого шкива: $v = \omega_1 R_1 = \omega_2 R_2$. Отсюда $\dfrac{D_1}{D_2} = \dfrac{R_1}{R_2} = \dfrac{\omega_2}{\omega_1} = \dfrac{\nu_2}{\nu_1}$. Следовательно, искомый диаметр $D_1 = D_2\dfrac{\nu_2}{\nu_1} = 100$ мм.

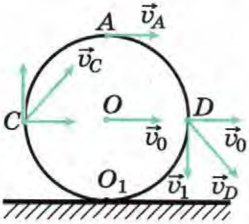


Рис. 1.64

Задача 2. Колесо, радиус которого 40 см, катится по горизонтальной дороге со скоростью 2 м/с. Определите скорости относительно дороги точек колеса, находящихся на концах его вертикального и горизонтального диаметров, а также ускорения этих точек.

Р е ш е н и е. Точка O_1 неподвижна относительно земли (рис. 1.64), следовательно, $v_1 = 0$. Если считать, что через точку O_1 проходит мгновенная ось вращения, то относительно неё скорости всех точек, согласно уравнению (1.29), будут равны $v = \omega r$, где r — расстояние от точки O_1 до выбранной точки обода. Угловая скорость вращения $\omega = v_0/R$.

Тогда $v_C = v_D = \omega R\sqrt{2} = v_0\sqrt{2} \approx 2{,}8$ м/с.

Скорость точки A $v_A = 2\omega R = 2v_0 = 4$ м/с.

Все точки обода относительно оси вращения движутся с одинаковыми линейными скоростями и, следовательно, с одинаковым ускорениями

$$a_{\text{цс}} = \frac{v_0^2}{R} = 10\ \text{м/с}^2.$$

Заметим, что эту задачу также можно решить на основе закона сложения скоростей. Так, например, скорость точки D равна сумме скорости $\vec{v_0}$ подвижной системы отсчёта, связанной с осью колеса, и скорости $\vec{v_1}$ точки обода D относительно этой оси.

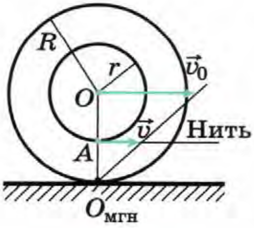


Рис. 1.65

Задача 3. Катушка с намотанной на неё нитью может катиться по поверхности горизонтального стола без скольжения. С какой скоростью v_0 и в каком направлении будет перемещаться ось катушки, если конец нити тянуть в горизонтальном направлении со скоростью v? Радиус внутренней части катушки r, внешней — R (рис. 1.65).

Решение. Скорость v — скорость движения нити — совпадает со скоростью точки A внутренней части катушки. $O_{\text{мгн}}$ — мгновенная ось вращения. Угловая скорость относительно мгновенной оси вращения $\omega = v/(R - r)$, так как расстояние $O_{\text{мгн}}A = R - r$. Отсюда $v_0 = \omega R = vR/(R - r)$.

Очевидно, что катушка перемещается в направлении движения конца нити. Скорость перемещения катушки будет больше, чем скорость нити.

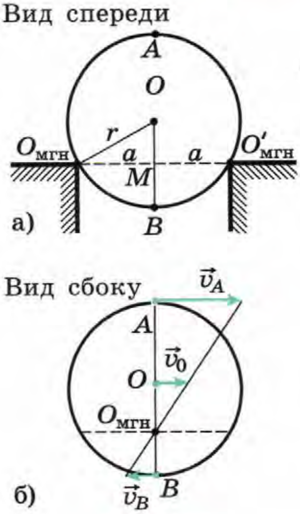


Рис. 1.66

Задача 4. Шарик радиусом r катится со скоростью v_0 по двум рельсам, расположенным на расстоянии $2a$ друг от друга. Определите скорости точек A и B относительно рельсов (рис. 1.66, *а*).

Решение. Мгновенная ось вращения $O_{\text{мгн}}$ в данном случае показана на рисунке 1.66, *б*. Угловая скорость поворота шарика относительно этой оси $\omega = v_0/OM$, где $OM = \sqrt{r^2 - a^2}$. Отсюда $\omega = v/\sqrt{r^2 - a^2}$, следовательно, $v_A = \omega(r + OM) = (v_0 / \sqrt{r^2 - a^2})(r + \sqrt{r^2 - a^2})$,

$v_A = (v_0 r / \sqrt{r^2 - a^2}) + v_0$, $v_B = \omega(r - OM) = (v_0 r / \sqrt{r^2 - a^2}) - v_0$.

Задачи для самостоятельного решения.

1. Линейная скорость периферийных точек шлифовального камня не должна превышать 95 м/с. Определите наибольшее допустимое число оборотов в минуту для диска диаметром 30 см.

2. Длина минутной стрелки часов на Спасской башне Московского Кремля 3,5 м. Определите модуль и изменение направления линейной скорости конца стрелки через каждые 15 мин в течение часа.

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 1 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Движение во времени и в пространстве»
1. Баллистическое движение.
2. Поступательное и вращательное движения в авиации.
3. Различные виды движения в производстве.

«Исследование зависимости дальности полёта водяной струи от угла наклона трубки, из которой под напором выходит вода»

ДИНАМИКА

ГЛАВА 2 ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА

Законам механики подчиняются движения всех окружающих нас тел. Для того чтобы открыть эти законы, Ньютону не потребовались какие-либо сложные приборы. Достаточными оказались простые опыты. Главная задача состояла в том, чтобы в огромном разнообразии движений тел увидеть то существенное, что определяет характер движения каждого тела.

§ 18 ОСНОВНОЕ УТВЕРЖДЕНИЕ МЕХАНИКИ

Что является причиной появления ускорения при движении тела?
При каком условии тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения?

Выбор системы отсчёта. Мы уже знаем, что любое движение следует рассматривать по отношению к определённой системе отсчёта.

В кинематике, т. е. при описании движения без рассмотрения причин, его вызывающих, все системы отсчёта равноправны. Выбор определённой системы отсчёта для решения той или иной задачи диктуется соображениями целесообразности и удобства. Так, при стыковке космических кораблей удобно рассматривать движение одного из них относительно другого, а не относительно Земли.

Обсудите, какое тело отсчёта следует выбрать при определении: 1) времени удаления ракеты от стартовой площадки; 2) расстояния, на которое за время t (с) удаляется воздушный шарик от выпустившего его из рук ребёнка; 3) времени перехода пассажира из одного вагона в другой.

ВАЖНО В разделе механики — динамике — рассматриваются взаимодействия тел, являющиеся причиной изменения движения этих тел, т. е. изменения их скоростей.

Вопрос о выборе системы отсчёта в динамике не является простым. Выберем вначале систему отсчёта, связанную с земным шаром. Движение тел вблизи поверхности Земли будем рассматривать относительно самой земли.

Что вызывает ускорение тел? Если тело, лежащее на полу или на столе, начинает двигаться, то всегда по соседству можно обнаружить предмет, который толкает это тело, тянет или действует на него на расстоянии (например, магнит на железный шар). Поднятый над землёй камень не остаётся висеть в воздухе, а падает. Очевидно, что именно действие Земли приводит к этому.

Понаблюдайте, что вызывает изменение скорости шайбы при игре в хоккей. С какими телами при этом шайба взаимодействует?

ВАЖНО Изменение скорости тела (а значит, ускорение) всегда вызывается воздействием на него каких-либо других тел.

Эта фраза содержит главное утверждение механики Ньютона и выражает *принцип причинности в механике*. Принцип причинности исключает влияние данного события на прошедшее событие. Данное событие может влиять только на последующие события. Этот принцип позволяет описать реакцию тела или системы тел на внешние воздействия.

Обсудите принцип причинности и предположите, в чём причина изменения, например, траектории полёта мяча, ударившегося о стенку; температуры проводника, по которому идёт ток.

Интересно

Футболист ударил по мячу. Ударил — значит, его нога оказала определённое действие на мяч, и скорость мяча увеличилась. А вот какое действие позволяет футболисту быстро устремиться к воротам противника? Одного желания здесь мало. Будь вместо футбольного поля идеально гладкий лёд, а на ногах футболиста вместо бутс с шипами тапочки с гладкой подошвой, это ему не удалось бы. Для того чтобы бежать с ускорением, нужно упираться ногами в землю. Если ноги будут скользить, вы никуда не убежите. Значит, только трение о землю, действие со стороны земли на ноги футболиста позволяет ему, да и всем нам, при беге и ходьбе изменять свою скорость. Точно так же, чтобы остановиться с разбегу, надо упираться ногами в землю.

Запомни Явление, при котором тело сохраняет скорость, когда на него не действуют другие тела, называется **явлением инерции**.

Это явление не является само собой разумеющимся. Понадобился гений Галилея и Ньютона, чтобы его осознать. Ньютону вслед за Галилеем удалось окончательно развеять одно из глубочайших заблуждений человечества о законах движения тел.

Важно Если действий со стороны других тел на данное тело нет, то согласно основному утверждению механики ускорение тела равно нулю, т. е. тело будет покоиться или двигаться с постоянной скоростью.

Начиная с великого древнегреческого философа Аристотеля, на протяжении почти двадцати веков все были убеждены, что движение тела с постоянной скоростью нуждается для своего поддержания в действиях, производимых на тело извне, т. е. в некоторой активной причине. Считали, что без такой поддержки тело обязательно остановится.

Это, казалось, находит подтверждение в нашем повседневном опыте. Например, автомобиль с выключенным двигателем останавливается и на совершенно горизонтальной дороге. Для поддержания его постоянной скорости необходимо, чтобы двигатель был включён.

Может оказаться и так, что тело покоится или движется равномерно

Приведите примеры движения по инерции.

Интересно

По утверждению Аристотеля, различия в движении двух тел обусловлены различиями тех мест, в которых эти тела находятся. Аристотель выдвигает как непреложную аксиому следующее утверждение: если тело находится в месте, свойственном ему по природе, то оно будет неподвижно; но если оно находится в месте, несвойственном его природе, то оно будет двигаться из места, где оно оказалось, к месту, указанному ему его природой.

и прямолинейно, т. е. без ускорения ($\vec{a} = 0$), хотя на него и действуют другие тела. На столе лежит книга, её ускорение равно нулю, хотя действие со стороны других тел налицо. На книгу действуют Земля, притягивающая её, и стол, который не даёт ей упасть. В этом случае говорят, что действия уравновешивают (или компенсируют) друг друга.

Можно ли сказать, что свободное падение — это падение свободного тела?

В действительности же *свободное тело*, которое не взаимодействует с другими телами, движется всегда с постоянной скоростью или находится в покое.

Запомни **Свободным** телом называется тело, которое не взаимодействует с другими телами.

Только действие со стороны другого тела способно изменить его скорость. Если бы не было сопротивления движению со стороны земли, то скорость автомобиля на горизонтальном шоссе и при выключенном двигателе оставалась бы постоянной.

Галилеем был сформулирован *закон инерции*.

Закон инерции Тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела.

Подумайте, зависит ли ускорение тела от того, в каком состоянии оно было до начала движения, находилось в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

Состояние покоя и состояние равномерного прямолинейного движения ($\vec{a} = 0$) с точки зрения динамики не различаются.

Инерция. Принцип причинности в механике Найти

1. В чём состоит явление инерции?
2. Что такое свободное тело?
3. При каких условиях тело сохраняет состояние покоя?
4. Какую систему отсчёта мы выбрали при рассмотрении движения тел?
5. Можно ли утверждать, что состояние покоя и состояние равномерного прямолинейного движения с точки зрения кинематики не различаются?
6. Как определить, что наблюдаемое тело начало взаимодействовать с другим телом?
7. Выполняется ли закон инерции в системе, тело отсчёта в которой движется с ускорением?

§ 19 СИЛА. МАССА. ЕДИНИЦА МАССЫ

Что является причиной изменения скорости тел?
Что можно сказать о скорости и ускорении тела, к которому не приложена никакая сила?

Основное утверждение механики состоит в том, что ускорения тел определяются действиями на них других тел.

Запомни **Силой** в механике называют количественную меру действия тел друг на друга, в результате которого тела получают ускорения или испытывают деформацию.

Это определение основано на главном утверждении механики:
1) ускорения тел вызываются силами;
2) силы, действующие на тело, обусловлены действиями на него других тел.

Важно Сила — мера взаимодействия тел.

С какими телами взаимодействует ребёнок, катающийся на карусели?

Понятие силы относится к двум телам. С самого начала нужно отчётливо представить себе, что понятие силы относится именно к двум телам, а не к одному. Всегда можно указать тело, на которое действует сила, и тело, со стороны которого она действует. Так, сила тяжести действует на камень со стороны Земли, а на шарик, подвешенный на пружине, действует сила упругости со стороны пружины.

Сила имеет направление. Так, сила упругости растянутой пружины действует вдоль её оси. Сила трения останавливает скользящую по льду шайбу и направлена против скорости её движения.

Важно Сила — векторная величина.

Сравнение сил. Для количественного определения силы мы должны уметь её измерять. Только при этом условии можно говорить о силе как об определённой физической величине. Но ведь действия на данное тело могут быть самыми разнообразными. Что общего, казалось бы, между силой притяжения Земли к Солнцу и силой, которая, преодолевая тяготение, заставляет взмывать вверх ракету, или между этими двумя силами и силой, сжимающей мяч в руке, определяемой сокращением мускул? Ведь они совершенно различны по своей природе! Можно ли говорить о них как о чём-то физически родственном? Можно ли сравнивать их?

Важно Две силы независимо от их природы считаются равными и противоположно направленными, если их одновременное действие на тело не меняет его скорости (т. е. не сообщает телу ускорение).

Это определение позволяет измерять силы, если одну из них принять за единицу измерения.

Измерение сил. Для измерения сил необходим эталон единицы силы.

В качестве эталона единицы силы выберем силу $\vec{F_0}$, с которой некоторая определённая (эталонная) пружина при фиксированном растяжении Δx дей-

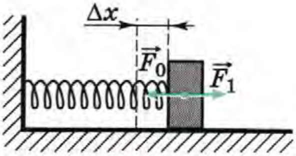


Рис. 2.1

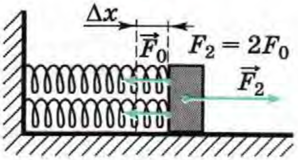


Рис. 2.2

ствует на прикреплённое к ней тело (рис. 2.1). Сила упругости пружины направлена вдоль оси пружины.

Установим способ сравнения сил с эталонной силой.

По определению две силы считаются равными и противоположными по направлению, если при одновременном действии они не сообщают телу ускорение. Следовательно, измеряемая сила $\vec{F}_1$ равна по модулю эталонной силе $\vec{F}_0$ и направлена в противоположную сторону, если под воздействием этих сил тело не получает ускорение (см. рис. 2.1). Причём сила $\vec{F}_1$ может быть любой природы: силой давления, силой трения и т. д.

Если к телу прикрепить две пружины и растянуть их также на Δx (рис. 2.2), то равнодействующая сила будет равна $2\vec{F}_0$. Сила $\vec{F}_2$, направленная в противоположную сторону, по модулю также равна $2\vec{F}_0$, если все три силы, действуя одновременно на тело, не сообщают ему ускорение.

Таким образом, располагая эталоном силы, мы можем измерять силы, кратные эталону. Для этого к телу, на которое действует измеряемая сила, прикладывают в сторону, противоположную её направлению, такое количество эталонных сил, чтобы тело не получило ускорение, и подсчитывают число эталонных сил. Естественно, что при этом мы можем измерить силу не меньше эталонной силы $\vec{F}_0$ и ошибка измерения будет также не меньше ошибки измерения эталонной силы.

Выбрав эталонную силу достаточно малой, можно в принципе производить измерения разных сил с требуемой точностью.

Можно ли при задании эталонной силы не растягивать, а сжимать пружину?

Динамометр. На практике для измерения сил применяют динамометр (рис. 2.3). Использование динамометра основано на том, что при упругой деформации удлинение пружины прямо пропорционально приложенной к ней силе. Поэтому по длине пружины можно судить о значении силы.

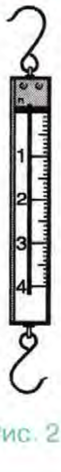


Рис. 2.3

О силах в механике. В механике не рассматривается природа тех или иных сил и не делаются попытки выяснить, вследствие каких физических процессов появляются те или иные силы. Это задача других разделов физики.

В механике важно лишь знать, при каких условиях возникают силы, каковы их направления и чему равны их модули, т. е. знать, как силы зависят от расстояний между телами и от скоростей их движения. А знать модули сил, определять, когда и как они действуют, можно, не вникая в природу сил, а лишь располагая способами их измерения.

В механике имеют дело с тремя типами сил: гравитационными силами, силами упругости и силами трения. Модули и направления этих сил определяются опытным путём. Важно, что все рассматриваемые в механике силы зависят либо только от расстояний между телами или от расположения частей тела (гравитация и упругость), либо только от относительных скоростей тел (трение).

Интересно

Когда человек не может поднять тяжёлую вещь, он говорит: «Не хватает сил». При этом, в сущности, происходит сравнение двух совершенно разных по своей природе сил — мускульной силы и силы, с которой Земля притягивает этот предмет. Но если вы подняли тяжёлый предмет и держите его на весу, то ничто не мешает вам утверждать, что сила, действующая на тело со стороны ваших рук, по модулю равна силе тяжести. Это утверждение, по существу, и является определением равенства сил в механике.

Инертность тела. Мы уже говорили о явлении инерции. Именно вследствие инерции покоящееся тело приобретает заметную скорость под действием силы не сразу, а лишь за некоторый интервал времени.

Запомни

Инертность — свойство тел по-разному изменять свою скорость под действием одной и той же силы.

Ускорение возникает сразу, одновременно с началом действия силы, но скорость нарастает постепенно. Даже очень большая сила не в состоянии сообщить телу сразу значительную скорость. Для этого нужно время. Чтобы остановить тело, опять-таки нужно, чтобы тормозящая сила, как бы она ни была велика, действовала некоторое время.

Именно эти факты имеют в виду, когда говорят, что тела *инертны*, т. е. одним из свойств тела является инертность, а количественной мерой инертности является *масса*.

Приведём примеры простых опытов, в которых очень отчётливо проявляется инертность тел.

1. На рисунке 2.4 изображён массивный шар, подвешенный на тонкой нити. Внизу к шару привязана точно такая же нить. Если медленно тянуть за нижнюю нить, то порвётся верхняя нить: ведь на неё действуют и шар своей тяжестью, и сила, с которой мы тянем шар вниз. Однако если за нижнюю нить очень быстро дёрнуть, то оборвётся именно она, что на первый взгляд довольно странно.

Рис. 2.4

Но это легко объяснить. Когда мы тянем за нить медленно, то шар постепенно опускается, растягивая верхнюю нить до тех пор, пока она не оборвётся. При быстром рывке с большой силой шар получает большое ускорение, но скорость его не успевает увеличиться сколько-нибудь значительно за тот малый промежуток времени, в течение которого нижняя нить сильно растягивается и обрывается. Верхняя нить поэтому мало растягивается и остаётся целой.

Выполните самостоятельно этот опыт и убедитесь в описанных результатах.

2. Интересен опыт с длинной палкой, подвешенной на бумажных

Объясните описанный опыт с палкой.

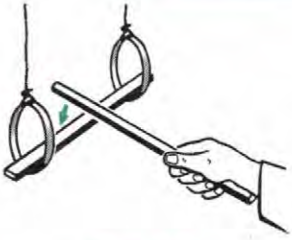


Рис. 2.5

кольцах (рис. 2.5). Если резко ударить по палке железным стержнем, то палка ломается, а бумажные кольца остаются невредимыми.

3. Наконец, самый, пожалуй, эффектный опыт. Если выстрелить в пустой пластмассовый сосуд, пуля оставит в стенках правильные отверстия, но сосуд останется целым. Если же выстрелить в такой же сосуд, заполненный водой, то сосуд разорвётся на мелкие части. Это объясняется тем, что вода малосжимаема и небольшое изменение её объёма приводит к резкому возрастанию давления. Когда пуля очень быстро входит в воду, пробив стенку сосуда, давление резко возрастает. Из-за инертности воды её уровень не успевает повыситься, и возросшее давление разрывает сосуд на части.

Понаблюдайте за различными телами и определите, как зависит инертность тела от его массы.

Чем больше масса тела, тем больше его инертность, тем сложнее вывести тело из первоначального состояния, т. е. заставить его двигаться или, наоборот, остановить его движение.

Единица массы. В кинематике мы пользовались двумя основными физическими величинами — длиной и временем. Для единиц этих величин установлены соответствующие эталоны, сравнением с которыми определяются любая длина и любой интервал времени. Единицей длины является метр, а единицей времени — секунда. Все другие кинематические величины не имеют эталонов единиц. Единицы таких величин называются производными.

Приведите примеры производных единиц физических величин в кинематике.

При переходе к динамике мы должны ввести ещё одну основную единицу и установить её эталон.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу массы — один килограмм (1 кг) — принята масса эталонной гири из сплава платины и иридия, которая хранится в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа. Точные копии этой гири имеются во всех странах. Приближённо массу 1 кг имеет вода объёмом 1 л при комнатной температуре. Легко осуществимые способы сравнения любой массы с массой эталона путём взвешивания мы рассмотрим позднее.

Инертность. Масса. Сила. Динамометр — Найти

1. При каких условиях тело движется с постоянной скоростью?
2. Дайте определение силы.
3. Какие две силы считаются в механике равными?
4. Как складываются силы, действующие на тело?
5. Чем отличаются основные единицы физических величин от производных единиц?

§ 20 ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Какое явление называют инерцией?
Что называют системой отсчёта?

Закон инерции относится к самому простому случаю движения — движению тела, которое не взаимодействует с другими телами, т. е. движению свободного тела.

Ответить на вопрос, как же движутся свободные тела, не обращаясь к опыту, нельзя. Однако нельзя поставить ни одного опыта, который бы в чистом виде показал, как движется ни с чем не взаимодействующее тело, так как таких тел нет. Как же быть?

Имеется лишь один выход. Надо поместить тело в условия, при которых влияние внешних взаимодействий можно делать всё меньшим и меньшим, и наблюдать, к чему это ведёт. Можно, например, наблюдать за движением гладкого камня на горизонтальной поверхности, после того как ему сообщена некоторая скорость. (Притяжение камня к Земле компенсируется действием поверхности, на которую он опирается; на скорость его движения влияет только трение.) При этом легко обнаружить, что, чем более гладкой является поверхность, тем медленнее будет уменьшаться скорость камня. На гладком льду камень скользит весьма долго, не меняя заметно скорость. На основе подобных наблюдений можно сделать вывод: если бы поверхность была идеально гладкой, то при отсутствии сопротивления воздуха (в вакууме) камень совсем не менял бы своей скорости. Именно к такому выводу пришёл впервые Галилей.

Сформулируем *первый закон Ньютона*:

Первый закон Ньютона

Существуют системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела.

Интересно

Первый закон, или закон инерции, как его часто называют, фактически был открыт Галилеем, но строгую формулировку дал и включил его в число основных законов механики Исаак Ньютон.

Этот закон, с одной стороны, содержит *определение* инерциальной системы отсчёта. С другой стороны, он содержит *утверждение* (которое с той или иной степенью точности можно проверить на опыте) о том, что инерциальные системы отсчёта существуют в действительности.

Инерциальные и неинерциальные системы отсчёта. До сих пор систему отсчёта мы связывали с Землёй, т. е. рассматривали движение относительно Земли. В системе отсчёта, связанной с Землёй, ускорение тела определяется только действием на него других тел. Система отсчёта, связанная с Землёй, является инерциальной.

Из формулировки первого закона следует, что

Важно если есть одна инерциальная система отсчёта, то любая другая движущаяся относительно неё прямолинейно и равномерно также является инерциальной.

Рис. 2.6

Приведите примеры инерциальных и неинерциальных систем отсчёта.

Однако, помимо инерциальных систем отсчёта, есть и другие, в которых тело имеет ускорение даже в том случае, когда на него другие тела не действуют.

В качестве примера рассмотрим систему отсчёта, связанную с автобусом. При равномерном движении автобуса пассажир может не держаться за поручень, действие со стороны автобуса компенсируется взаимодействием с Землёй. При резком торможении автобуса стоящие в проходе пассажиры падают вперёд, получая ускорение относительно стенок автобуса (рис. 2.6). Однако это ускорение не вызвано какими-либо новыми воздействиями со стороны Земли или автобуса непосредственно на пассажиров. Относительно Земли пассажиры сохраняют свою постоянную скорость, но автобус начинает двигаться с ускорением, и пассажиры относительно него также движутся с ускорением. Ускорение появляется вследствие того, что движение их рассматривается относительно тела отсчёта (автобуса), движущегося с ускорением.

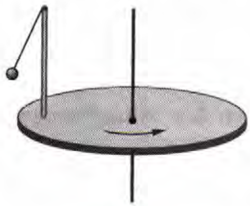


Рис. 2.7

Рассмотрим маятник, находящийся на вращающемся диске (рис. 2.7). Нить маятника отклонена от вертикали, хотя сам он неподвижен относительно диска. Натяжение нити не может быть скомпенсировано силой притяжения к Земле. Следовательно, отклонение маятника нельзя объяснить только его взаимодействием с телами.

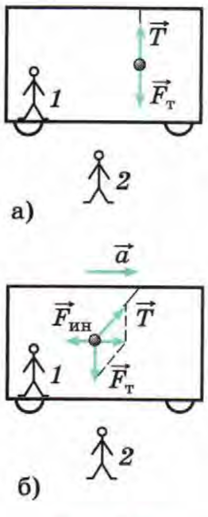


Рис. 2.8

Рассмотрим ещё один маятник, находящийся в неподвижном вагоне. Нить маятника вертикальна (рис. 2.8, *а*). Шарик взаимодействует с нитью и Землёй, сила натяжения нити равна силе тяжести. С точки зрения пассажира в вагоне и человека, стоящего на перроне, шарик находится в равновесии вследствие того, что сумма сил, действующих на него, равна нулю.

Как только вагон начинает двигаться с ускорением, нить маятника отклоняется (шарик по инерции стремится сохранить состояние покоя). С точки зрения человека, стоящего на перроне, ускорение шарика должно быть равно ускорению вагона, так как нить не разрывается и шарик движется вместе с вагоном. Шарик по-прежнему взаимодействует с теми же телами, сумма сил этого взаимодействия должна быть отлична от нуля и определять ускорение шарика.

С точки зрения пассажира, находящегося в вагоне, шарик неподвижен, следовательно, сумма сил, действующих на шарик, должна быть равна нулю, однако на шарик действуют те же силы — натяжения нити и сила тяжести. Значит, на шарик (рис. 2.8, *б*) должна действовать сила $\vec{F}_{ин}$, которая определяется тем, что система отсчёта, связанная с вагоном, неинерциальная. Эту силу называют *силой инерции* (см. рис. 2.8, *б*).

В неинерциальных системах отсчёта основное положение механики о том, что ускорение тела вызывается действием на него других тел, не выполняется.

Можно ли говорить о природе силы инерции?

Запомни Системы отсчёта, в которых не выполняется первый закон Ньютона, называются **неинерциальными**.

Инерциальные системы отсчёта. I закон Ньютона. И. Ньютон Найти

1. Какое утверждение содержится в первом законе Ньютона?
2. Какая система отсчёта называется инерциальной?
3. Каким образом можно установить, что данная система отсчёта является инерциальной?
4. Если за инерциальную систему отсчёта принять Землю, то какие надо выбрать на Земле тела отсчёта, чтобы системы, связанные с ними, были также инерциальными?

А1. Систему отсчёта, связанную с Землёй, будем считать инерциальной. Система отсчёта, связанная с автомобилем, тоже будет инерциальной, если автомобиль
1) движется равномерно по прямолинейному участку шоссе
2) разгоняется по прямолинейному участку шоссе
3) движется равномерно по извилистой дороге
4) по инерции вкатывается на гору

А2. Утверждение, что материальная точка покоится или движется равномерно и прямолинейно, если на неё не действуют другие тела или воздействие на него других тел взаимно уравновешено,
1) верно при любых условиях
2) верно в инерциальных системах отсчёта
3) верно для неинерциальных систем отсчёта
4) неверно ни в каких системах отсчёта

А3. В некоторой инерциальной системе отсчёта (ИСО) частица покоится. В любой другой ИСО она
1) покоится
2) движется прямолинейно
3) движется с ускорением
4) либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно

А4. Пассажиры, находящиеся в автобусе, непроизвольно отклонились назад. Это скорее всего вызвано тем, что автобус
1) повернул налево
2) повернул направо
3) начал тормозить
4) начал набирать скорость

А5. Мяч, лежащий на полу вагона движущегося поезда, покатился влево, если смотреть по ходу поезда. Как изменилось движение поезда?
1) скорость поезда увеличилась
2) скорость поезда уменьшилась
3) поезд повернул вправо
4) поезд повернул влево

§ 21 ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Когда тело движется ускоренно?
От чего зависит результат действия силы?

Установить на опыте связь между ускорением и силой с абсолютной точностью нельзя, так как любое измерение даёт только приблизительное значение измеряемой величины. Но определить характер зависимости ускорения от силы можно с помощью несложных опытов. Уже простые наблюдения показывают, что, чем больше сила, тем быстрее меняется скорость тела, т. е. больше его ускорение. Естественно предположить, что ускорение прямо пропорционально силе. Ускорение, конечно, может зависеть от силы и гораздо более сложным образом, но сначала надо посмотреть, не справедливо ли самое простое предположение.

Проще всего изучить поступательное движение тела, например металлического бруска, так как только при поступательном движении ускорение всех точек одинаково, и мы можем говорить об определённом ускорении тела в целом. Однако в этом случае сила трения о стол довольно велика и, главное, её трудно точно измерить. Поэтому возьмём установленную на рельсы тележку с лёгкими колёсами. Тогда сила трения будет сравнительно невелика, а массой колёс можно пренебречь по сравнению с массой тележки (рис. 2.9).

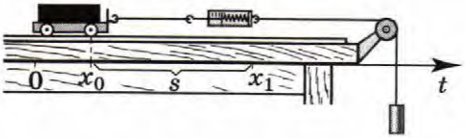


Рис. 2.9

Пусть на тележку действует постоянная сила со стороны нити, к концу которой прикреплён груз. Модуль силы измеряется пружинным динамометром. Эта сила постоянна, но не равна при движении силе тяжести, действующей на подвешенный груз. Измерить ускорение тележки можно, определяя время, затрачиваемое тележкой на прохождение пути s.

Предположив, что ускорение постоянно и начальная скорость равна нулю, согласно уравнению движения запишем $s = x_1 - x_0 = at^2/2$, где x_0 и x_1 — начальная и конечная координаты тела.

Отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}. \qquad (2.1)$$

Тщательные измерения модулей сил и ускорений показывают прямую пропорциональность между ними: $a \sim F$. Векторы $\vec{a}$ и $\vec{F}$ направлены по одной прямой в одну и ту же сторону.

На основании экспериментов было выявлено, что отношение модуля силы к модулю ускорения является постоянной величиной, не зависящей от силы:

$$\frac{F}{a} = \text{const}.$$

Запомни Величину F/a, равную отношению модуля силы к модулю ускорения, называют **массой** тела.

Итак, мы выяснили, что ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе и тем меньше, чем больше масса тела. Сформулируем *второй закон Ньютона.*

Второй закон Ньютона

Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на него, и обратно пропорционально его массе: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

Эта формула выражает один из самых фундаментальных законов природы, которому с удивительной точностью подчиняется движение как громадных небесных тел, так и мельчайших песчинок. С помощью этого закона можно рассчитать движение поршня в цилиндре автомобиля и сложнейшие траектории космических кораблей. Для решения задач мы чаще пользуемся другой формулировкой второго закона Ньютона.

Важно Произведение массы тела на ускорение равно сумме действующих на тело сил:

$$m\vec{a} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} + \ldots \quad (2.2)$$

Заметим, что если на тело не действуют силы или их сумма равна нулю ($\vec{F} = 0$), то относительно инерциальной системы отсчёта $\vec{a} = 0$ и, следовательно, $\vec{v} = \text{const}$. Однако это не означает, что первый закон Ньютона есть следствие второго. Ещё раз подчеркнём, что первый закон Ньютона устанавливает существование инерциальных систем отсчёта, а именно таких систем, в которых справедлив второй закон Ньютона.

Интересно

Ньютон ввёл понятие массы как количества вещества в данном теле.

За единицу силы в Международной системе единиц принимается сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2.

Эта единица называется *ньютоном* (сокращённое обозначение — Н). Наименование ньютона:

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

Сформулированные законы Ньютона справедливы для тел, которые можно считать материальными точками. Во многих случаях форма и размеры тела не оказывают существенного влияния на характер механического движения.

Измерение массы. Измерить массу тела можно с помощью рычажных весов.

Равновесие рычажных весов с одинаковыми плечами будет в том случае, когда оба тела, положенные на чашки весов, давят на них одинаково. Давление же определяется массой этих тел.

Представим, что у нас есть эталонная масса 1 кг, тогда, если любое другое тело уравновешивает эталон, то масса его равна 1 кг. Теперь мы можем измерять массу, равную 2 кг, и т. д. Разделив тело массой 1 кг на две равные части, мы получим два тела по 500 г, которые также можно использовать для измерения. Разделив одно из тел также на две равные части, мы получим массы по 250 г и т. д. Таким образом, мы можем измерять любые массы, используя наборы тел с разными массами.

Почему мы определяем массу тела на рычажных весах, а не измеряем динамометром?

Интересно Уверенность в справедливости второго закона Ньютона вытекает не столько из отдельных опытов, на основании которых удаётся подойти к формулировке этого закона, сколько из того, что все вытекающие из него следствия, проверяемые как специальными опытами, так и всей человеческой практикой, оказываются правильными.

Если измерить массы m_1, m_2, m_3, ... нескольких тел, а затем соединить все эти тела вместе и измерить массу m одного объединённого тела, то будет выполняться простое соотношение: $m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$.

Справедливо и обратное: если разделить тело на части, то сумма масс этих частей будет равна массе тела до разделения.

Измерение массы в данном случае основано на том, что на тела действует сила притяжения к Земле. Следовательно, измеряемая таким способом масса является *гравитационной массой*.

Измерить массу тела также можно на основе явления инерции. Ускорение тела, согласно второму закону Ньютона, прямо пропорционально силе, действующей на тело, и обратно пропорционально его массе. Если на два тела действуют одинаковые силы, то отношение масс равно обратному отношению ускорений:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}. \tag{2.3}$$

Если у нас есть тело, массу которого мы знаем, то, измерив ускорения этого тела и тела с неизвестной массой, движущихся под действием одинаковых сил, определим неизвестную массу по формуле (2.3). Определяемая таким способом масса является *инертной массой*.

Можно убедиться, что массы тела, измеренные указанными двумя способами равны, т. е. гравитационная масса тела равна его инертной массе.

II закон Ньютона. Гравитационная и инертная массы | Найти

?

1. Можно ли утверждать, что первый закон Ньютона является следствием второго?
2. При каких условиях материальная точка движется равномерно и прямолинейно?
3. Какие условия необходимы для того, чтобы тело двигалось с постоянным ускорением?
4. Легкоподвижную тележку массой 3 кг толкают силой 6 Н. Чему равно ускорение тележки в инерциальной системе отсчёта?
5. В инерциальной системе отсчёта сила F сообщает телу массой m ускорение a. Как изменится ускорение тела, если массу тела и действующую на него силу увеличить в 2 раза?

§ 22 ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ СИЛ

Какие силы действуют на взлетающий воздушный шар?
Какая сила в этом случае входит во второй закон Ньютона?

Согласно второму закону Ньютона ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, при этом направления ускорения и силы совпадают (рис. 2.10).

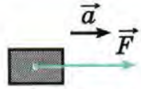


Рис. 2.10

Однако в большинстве случаев тело взаимодействует не с одним телом, а с несколькими, и в результате этих взаимодействий на тело действуют несколько сил. Например, при подъёме груза на канате на груз действуют сила тяжести и сила натяжения каната, при движении автомобиля по дороге на него действуют сила тяжести, сила тяги, сила сопротивления и сила реакции опоры со стороны полотна дороги на колёса.

Приведите примеры тел, на которые при их движении действуют несколько сил. Какие силы действуют на парашют, на катер, на конькобежца?

Какую из нескольких действующих сил нужно считать определяющей, от какой из них зависит ускорение?

Важно Если на тело одновременно действуют несколько сил, то, как показывают эксперименты, ускорение тела будет пропорционально геометрической сумме всех этих сил:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_р}{m}, \text{ где } \vec{F}_р = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots$$

Это положение называется *принципом суперпозиции (наложения) сил*.

Таким образом, мы заменяем несколько сил одной силой.

Запомни Сила, которая производит на тело такое же действие (вызывает такое же движение), как несколько сил, одновременно приложенных к телу, называется **равнодействующей**.

Рассмотрим сначала случай, когда на тело действуют две силы, направленные вдоль одной прямой. Если силы направлены в одну сторону (рис. 2.11), то равнодействующая $\vec{F}_р = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, её модуль равен $F_р = F_1 + F_2$.

В случае когда силы направлены в противоположные стороны (рис. 2.12), их равнодействующая равна векторной сумме сил $\vec{F}_р = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, но её модуль равен $F_р = F_1 - F_2$. Очевидно, что ускорение тела направлено в сторону большей по модулю силы.

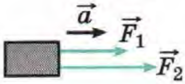


Рис. 2.11

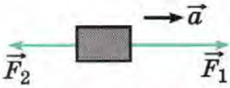


Рис. 2.12

Докажите соседу по парте, что действие каждой из сил не зависит от действия других сил. Для этого придумайте и проведите простой опыт.

Важно Обратим внимание на то, что действие каждой из этих сил не зависит от наличия других сил.

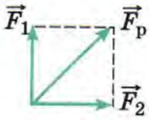


Рис. 2.13

На рисунке 2.13 показаны две силы, равные по модулю ($F_1 = F_2 = F$) и направленные друг к другу под прямым углом. Очевидно, что модуль равнодействующей равен

$$F_\text{р} = \sqrt{2}F. \qquad (2.4)$$

Эта сила по модулю больше силы F, но меньше силы $2F$.

Выполните с соседом по парте эксперимент. На гладкую горизонтальную поверхность положите гладкий брусок и прикрепите к нему три динамометра. Два из них расположите под углом 90°, а третий вдоль линии, находящейся под углом 135° к первым двум. Растяните пружины всех динамометров, при этом брусок должен оставаться на месте и показания первых двух динамометров должны быть одинаковы. Снимите показания третьего динамометра.
Оставьте только первый динамометр, причём расположите его по одной прямой с третьим. Растяните пружину третьего динамометра до длины, которая была в первом опыте. Следите за тем, чтобы брусок был неподвижен. Измерьте силу, показываемую первым динамометром. Убедитесь в справедливости формулы (2.4).

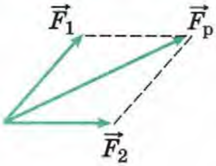


Рис. 2.14

Если силы, действующие на тело, направлены под некоторым углом, то равнодействующую этих сил определяем по правилу параллелограмма: эта равнодействующая равна диагонали параллелограмма (рис. 2.14). Так как принцип суперпозиции сил справедлив и для проекций сил, то при выборе прямоугольной системы координат в проекциях на оси OX и OY уравнение $m\vec{a} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \ldots$ можно записать в виде

$$ma_x = F_{1x} + F_{2x} + \ldots;$$
$$ma_y = F_{1y} + F_{2y} + \ldots.$$

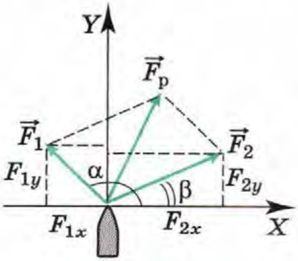


Рис. 2.15

Рассмотрим пример. Лодку подтягивают к берегу двумя канатами. Натяжение первого равно 300 Н, второго 400 Н (рис. 2.15).
С осью OX векторы сил $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$ составляют углы 135° и 30°. Определим равнодействующую сил, действующих на лодку.
Спроецируем силы на ось OX:

$$F_{1x} = F_1\cos 135° = -300 \cdot 0{,}707\,(\text{Н}) = -212\,\text{Н};$$
$$F_{2x} = F_2\cos 30° = 400 \cdot 0{,}866\,(\text{Н}) = 346\,\text{Н}.$$

Как будет направлено ускорение лодки? Совпадает ли направление ускорения с направлением скорости лодки?

Проекции сил на ось OY:

$$F_{1y} = F_1\sin 135° = 212\,\text{Н};$$
$$F_{2y} = F_2\sin 30° = 200\,\text{Н}.$$

Проекции равнодействующей силы:

$$F_{px} = 346 - 212(\text{Н}) = 134\,\text{Н};$$
$$F_{py} = 212 + 200(\text{Н}) = 412\,\text{Н}.$$

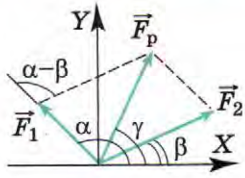


Рис. 2.16

Тогда равнодействующая сила равна

$$F_р = \sqrt{F_{px}^2 + F_{py}^2} = \sqrt{134^2 + 412^2}(\text{Н}) \approx 433\,\text{Н}.$$

Угол, который образует равнодействующая сила с осью OX, определим из выражения $\operatorname{tg}\gamma = \dfrac{F_{py}}{F_{px}} = \dfrac{412}{134} = 3{,}07$. Угол $\gamma = 72°$.

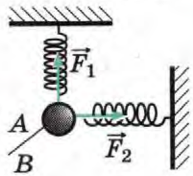
Равнодействующую силу также можно найти по теореме косинусов (рис. 2.16): $F_р^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos(\alpha - \beta)$.

Равнодействующая сила. Принцип суперпозиции сил Найти

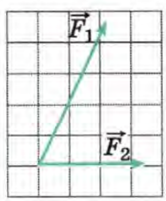
А1. Тело массой 5 кг движется вертикально вверх с ускорением 2 м/с^2. Определите модуль и направление равнодействующей силы.
1) 10 Н; вертикально вверх
2) 60 Н; вертикально вниз
3) 60 Н; вертикально вверх
4) 10 Н; вертикально вниз

А2. Автомобиль массой 500 кг разгоняется с места равноускоренно и достигает скорости 20 м/с за 10 с. Равнодействующая всех сил, действующих на автомобиль, равна
1) 500 Н 2) 1000 Н 3) 2000 Н 4) 4000 Н

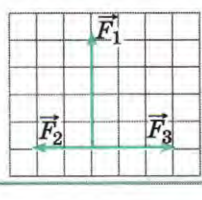
А3. Ученик собрал на столе установку. Тело A под действием трёх сил находится в равновесии (см. рис.). Чему равна сила упругости нити AB, если сила F_1, равная 3 Н, и сила F_2, равная 4 Н, перпендикулярны друг другу?
1) 3 Н 2) 4 Н 3) 5 Н 4) 7 Н



А4. На тело в инерциальной системе отсчёта действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (см. рис.). Как направлена равнодействующая сила?
1) ↗ 2) ↖ 3) ↘ 4) →



А5. На тело, находящееся на горизонтальной плоскости, действуют три силы (см. рис.). Чему равен модуль равнодействующей силы, если $F_2 = 2$ Н?
1) 3 Н 2) 4 Н 3) $\sqrt{8}$ Н 4) $\sqrt{17}$ Н



§ 23 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА»

Познакомимся с задачами, для решения которых не нужно знать, как зависят силы от расстояний между взаимодействующими телами (или частями одного тела) и от их скоростей. Единственное, что нам потребуется, — это выражение для силы тяжести вблизи поверхности Земли: $\vec{F}_т = m\vec{g}$.

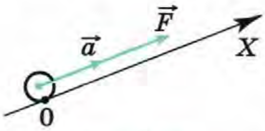


Рис. 2.17

Задача 1. К центру однородного шарика массой $m = 0{,}2$ кг приложена сила $F = 1{,}5$ Н. Определите модуль и направление силы $\vec{F_1}$, которую необходимо приложить к центру шарика помимо силы $\vec{F}$, чтобы шарик двигался с ускорением $a = 5$ м/с^2, направленным так же, как и сила $\vec{F}$ (рис. 2.17).

Решение. На шарик действуют две силы: сила $\vec{F}$ и искомая сила $\vec{F_1}$. Поскольку модуль и направление силы $\vec{F_1}$ неизвестны, можно изобразить на рисунке сначала только силу $\vec{F}$ (см. рис. 2.17). Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F_1}$. Отсюда $\vec{F_1} = m\vec{a} - \vec{F}$. Так как векторы $m\vec{a}$ и $\vec{F}$ в любой момент времени должны быть расположены на одной прямой, то и сила $\vec{F_1}$, являясь их разностью, расположена на той же прямой.

Таким образом, искомая сила может быть направлена либо так же, как сила $\vec{F}$, либо противоположно ей. Чтобы определить модуль и направление силы $\vec{F_1}$, найдём её проекцию на ось X, направление которой совпадает с силой $\vec{F}$. Учитывая, что $F_x = F$ и $a_x = a$, выражение для силы $\vec{F_1}$ в проекциях на ось X можно записать в виде $F_{1x} = ma - F$.

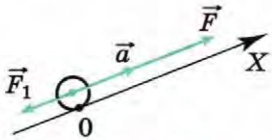


Рис. 2.18

Проанализируем последнее выражение. Если $ma > F$, то $F_{1x} > 0$, т. е. сила $\vec{F_1}$ направлена так же, как и ось X. Если же $ma < F$, то $F_{1x} < 0$, т. е. сила $\vec{F_1}$ направлена противоположно направлению оси X. Для рассматриваемого случая

$$F_{1x} = 0{,}2 \cdot 5\,\text{Н} - 1{,}5\,\text{Н} = -0{,}5\,\text{Н}.$$

Следовательно, сила $\vec{F_1}$ направлена противоположно оси X (рис. 2.18).

Задача 2. В результате полученного толчка брусок начал скользить вверх по наклонной плоскости из точки O с начальной скоростью $\upsilon_0 = 4{,}4$ м/с. Определите положение бруска относительно точки O через промежуток времени $t_1 = 2$ с после начала его движения, если угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 30°$. Трение не учитывайте.

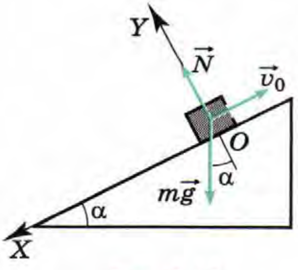


Рис. 2.19

Решение. Поскольку требуется найти положение бруска относительно точки O, начало координат возьмём в этой точке. Ось X направим вдоль наклонной плоскости вниз, а ось Y — перпендикулярно этой плоскости вверх (рис. 2.19). При движении бруска на него действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$ наклонной плоскости, перпендикулярная последней. Эту силу иногда называют силой нормальной реакции. Она всегда перпендикулярна поверхности, на которой находится тело.

Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}$. Так как на брусок действуют постоянные силы, то вдоль оси X он будет двигаться с постоянным ускорением. Следовательно, чтобы определить положение бруска относительно точки O, можно воспользоваться кинематическим уравнением

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

При сделанном выборе направления оси X и начала координат имеем $x_0 = 0$ и $v_{0x} = -v_0$. Проекцию ускорения a_x на ось X найдём по второму закону Ньютона. Для рассматриваемого случая $ma_x = mg_x + N_x$. Учитывая, что $g_x = g\sin\alpha$ и $N_x = 0$, получим $a_x = g\sin\alpha$. Таким образом,

$$x = -v_0 t + \frac{gt^2 \sin\alpha}{2} = 1 \text{ м}.$$

Задача 3. Два тела массами $m_1 = 10$ г и $m_2 = 15$ г связаны нерастяжимой и невесомой нитью, перекинутой через невесомый блок, установленный на наклонной плоскости (рис. 2.20). Плоскость образует с горизонтом угол $\alpha = 30°$. Определите ускорение, с которым будут двигаться эти тела. Трение не учитывайте.

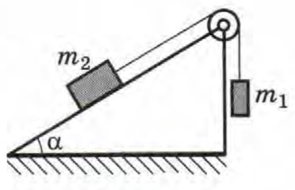


Рис. 2.20

Р е ш е н и е. Предположим, что тело массой m_1 перетягивает. Выберем оси координат так, как показано на рисунке 2.21. В проекциях на оси X_1 и X уравнения движения тел запишем в виде $m_1a_{x1} = m_1g - T_1$, $m_2a_x = T_2 - m_2g\sin\alpha$, $|a_x| = |a_{x1}|$, так как нить нерастяжима. Силы натяжения нити равны, так как нить и блок невесомы. Сложив левые и правые части уравнений, получим $a_x = \frac{m_1 - m_2\sin\alpha}{m_1 + m_2} g = 0{,}98$ м/с^2. Так как $a_x > 0$, то движение тел происходит в выбранном направлении.

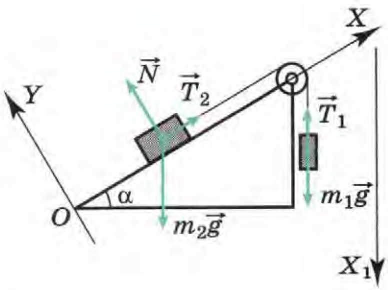


Рис. 2.21

Задача 4. Автомобиль массой $m = 1000$ кг движется со скоростью $v = 36$ км/ч по выпуклому мосту, имеющему радиус кривизны $R = 50$ м. С какой силой F давит автомобиль на мост в его середине? С какой минимальной скоростью $v_{\min}$ должен двигаться автомобиль для того, чтобы в верхней точке он перестал оказывать давление на мост?

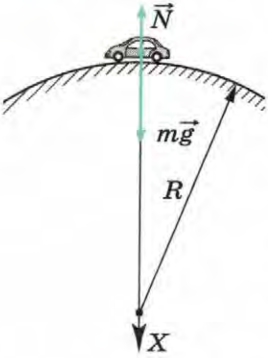


Рис. 2.22

Решение. Силы, действующие на автомобиль вдоль радиуса моста, изображены на рисунке 2.22: $m\vec{g}$ — сила тяжести; $\vec{N}$ — сила нормальной реакции моста. По третьему закону Ньютона искомая сила давления $\vec{F}$ равна по модулю силе реакции моста $\vec{N}$. При движении тела по окружности всегда направляем одну из осей координат от тела к центру окружности. Согласно второму закону Ньютона центростремительное ускорение автомобиля определяется суммой сил, действующих на него вдоль радиуса окружности, по которой он движется: $mv^2/R = mg - N$.

Отсюда $F = N = m(g - v^2/R) = 7{,}8$ кН. Сила давления на мост станет равной нулю при $mv_{\min}^2/R = mg$, так что $v_{\min} = 80$ км/ч. При скорости, превышающей $v_{\min}$, автомобиль оторвётся от поверхности моста.

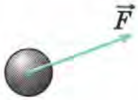


Рис. 2.23

Задачи для самостоятельного решения

1. К центру шара приложена сила $\vec{F}$ (рис. 2.23). Куда направлено ускорение шара? В каком направлении движется шар?

2. На полу лифта находится тело массой 50 кг. Лифт поднимается так, что за 3 с его скорость изменяется от 8 до 2 м/с. Определите силу давления тела на пол лифта.

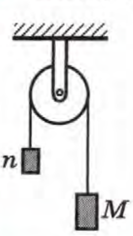
3. Тепловоз на горизонтальном участке пути длиной 600 м развивает постоянную силу тяги 147 кН. Скорость поезда возрастает при этом от 36 до 54 км/ч. Определите силу сопротивления движению, считая её постоянной. Масса поезда 1000 т.

4. Жёсткий стержень длиной 1 м с прикреплённым к нему шариком массой 100 г вращается равномерно в вертикальной плоскости. Определите модуль и направление силы, с которой стержень действует на шарик в верхней точке, при скоростях шарика 2 м/с и 4 м/с.

5. Два груза массами 2 кг и 4 кг, связанные нерастяжимой нитью, поднимают вертикально силой 84 Н, приложенной к первому грузу. Определите ускорение, с которым движутся грузы, и силу натяжения нити.

A1. Лыжник в начале спуска с горы имел скорость 2 м/с. Спустившись по склону горы, образующей угол 30° с горизонтом, лыжник увеличил свою скорость до 12 м/с. Какое расстояние проехал лыжник под уклон? Трение не учитывайте.

1) 12,5 м 2) 14 м 3) 50 м 100 м



A2. Брусок массой $M = 300$ г соединён с бруском массой $m = 200$ г невесомой и нерастяжимой нитью, перекинутой через невесомый блок (см. рис.). Чему равен модуль ускорения бруска массой 200 г?

1) 2 м/с^2 2) 3 м/с^2 3) 4 м/с^2 4) 6 м/с^2

§ 24 ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Какие силы возникают при взаимодействии тел?
В чём проявляется взаимодействие тел?
Какова природа сил взаимодействия?

В третьем законе Ньютона формулируется одно общее свойство всех сил, рассматриваемых в механике: любое действие тел друг на друга носит характер *взаимодействия*. Это означает, что если тело A действует на тело B, то и тело B действует на тело A.

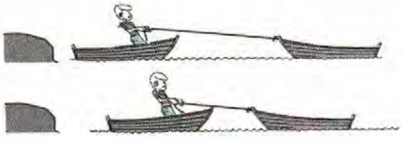


Рис. 2.24

Взаимодействие тел. Примеров взаимодействия тел и сообщения ими друг другу ускорений можно привести сколь угодно много. Когда вы, находясь в одной лодке, начнёте за верёвку подтягивать другую лодку, то и ваша лодка обязательно будет двигаться к ней (рис. 2.24). Вы действуете на верёвку, и верёвка действует на вас.

Если вы ударите ногой по футбольному мячу или толкнёте плечом товарища, то ощутите обратное действие на ногу или плечо. Всё это проявления закона взаимодействия тел.

Действия тел друг на друга носят характер взаимодействия не только при непосредственном контакте тел. Положите на гладкий стол два сильных магнита разноимёнными полюсами навстречу друг другу, и вы тут же обнаружите, что они начнут двигаться навстречу друг другу.

Изменения скоростей обоих взаимодействующих тел легко наблюдаются лишь в тех случаях, когда массы этих тел мало отличаются друг от друга. Если же взаимодействующие тела значительно различаются по массе, заметное ускорение получает только то из них, которое имеет меньшую массу. Так, при падении камня мы видим, что камень движется с ускорением, но ускорение Земли (а ведь камень тоже притягивает Землю!) практически обнаружить нельзя, так как оно очень мало.

Силы взаимодействия двух тел. Выясним с помощью опыта, как связаны между собой силы взаимодействия двух тел.

Возьмём достаточно сильный магнит и железный брусок, установим их на катки для уменьшения трения о стол (рис. 2.25). К концам магнита и бруска прикрепим одинаковые пружины, закреплённые другими концами на столе. Магнит и брусок притянутся друг к другу и растянут пружины. Опыт показывает, что к моменту прекращения движения пружины растянуты совершенно одинаково. Это означает, что на оба тела со стороны пружин действуют одинаковые по модулю и противоположные по направлению силы:

$$\vec{F_1} = -\vec{F_2}. \qquad (2.5)$$

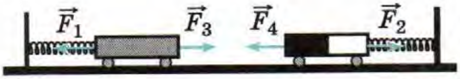


Рис. 2.25

С какими телами вы взаимодействуете, когда сидите за столом, идёте по дороге, работаете с компьютером?

Возьмите с товарищем по динамометру, соедините их крючками и начинайте растягивать. Понаблюдайте за показаниями динамометров. Сделайте вывод.

Так как магнит покоится, то сила $\vec{F_2}$ равна по модулю и противоположна по направлению силе $\vec{F_4}$, с которой на него действует брусок:

$$\vec{F_2} = -\vec{F_4}. \tag{2.6}$$

Точно так же равны по модулям и противоположны по направлению силы, действующие на брусок со стороны магнита и пружины:

$$\vec{F_3} = -\vec{F_1}. \tag{2.7}$$

Отсюда следует, что силы, с которыми взаимодействуют магнит и брусок, равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F_3} = -\vec{F_4}. \tag{2.8}$$

Третий закон Ньютона. На основе подобных опытов можно сформулировать *третий закон Ньютона.*

Третий закон Ньютона Силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены по одной прямой в противоположные стороны.

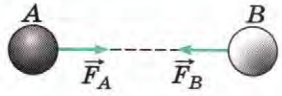


Рис. 2.26

Если на тело A со стороны тела B действует сила $\vec{F_A}$ (рис. 2.26), то одновременно на тело B со стороны тела A будет действовать сила $\vec{F_B}$, причём

$$\boxed{\vec{F_A} = -\vec{F_B}.} \tag{2.9}$$

Отметим, что силы взаимодействия двух тел — силы одной физической природы, время их действия одинаково, но они приложены к разным телам, следовательно, действие первого тела на второе не может быть скомпенсировано действием второго тела на первое.

Используя второй закон Ньютона, равенство (2.6) можно записать так:

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2. \tag{2.10}$$

Отсюда следует, что

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} = \text{const}, \tag{2.11}$$

т. е. отношение модулей ускорений a_1 и a_2 взаимодействующих друг с другом тел обратно пропорционально их массам (см. формулу (2.3) на с. 76).

III закон Ньютона. Взаимодействие тел | Найти

1. Правильна ли следующая запись третьего закона Ньютона:
а) $\vec{F}_{1,2} = \vec{F}_{2,1}$; б) $|\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}|$?

2. Лошадь тянет телегу, а телега действует на лошадь с такой же по модулю силой, направленной в противоположную сторону. Почему же лошадь везёт телегу, а не наоборот?

§ 25 ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОТСЧЁТА

Законы механики справедливы в инерциальных системах отсчёта. Можно ли систему отсчёта, связанную с Землёй, считать инерциальной?

Если тело относительно определённой инерциальной системы отсчёта движется с постоянной скоростью $\vec{v_1}$, то по отношению к системе отсчёта, которая сама движется со скоростью $\vec{v}$, это тело согласно закону сложения скоростей будет двигаться с некоторой новой, но также постоянной скоростью $\vec{v_2} = \vec{v_1} + \vec{v}$. Ускорение тела в обеих системах отсчёта равно нулю.

Напротив, любая система отсчёта, движущаяся с ускорением относительно инерциальной системы отсчёта, уже будет неинерциальной. Действительно, если $\vec{v_1} = \text{const}$, а скорость $\vec{v}$ изменяется, то скорость $\vec{v_2}$ также будет меняться с течением времени. Следовательно, характер движения тела будет изменяться при переходе от одной системы отсчёта к другой: в первой системе отсчёта движение тела равномерное, а во второй — ускоренное.

Рис. 2.27

Так как систему отсчёта, связанную с Землёй (рис. 2.27), можно приближённо рассматривать как инерциальную, то и системы отсчёта, связанные с поездом, движущимся с постоянной скоростью, или с кораблём, плывущим по прямой с неизменной скоростью, также будут инерциальными. Но как только поезд начнёт увеличивать свою скорость, связанная с ним система отсчёта перестанет быть инерциальной. Закон инерции и второй закон Ньютона перестанут выполняться, если рассматривать движение по отношению к таким системам.

Геоцентрическая система отсчёта инерциальна лишь приближённо.

Почему систему отсчёта, связанную с Землёй, называют геоцентрической? Как называется система отсчёта, связанная с Солнцем?

Наиболее близка к инерциальной система отсчёта, связанная с Солнцем и неподвижными звёздами (рис. 2.28). Земля же движется по отношению к этой системе отсчёта с ускорением. Во-первых, она вращается вокруг своей оси и, во-вторых, движется по замкнутой орбите вокруг Солнца.

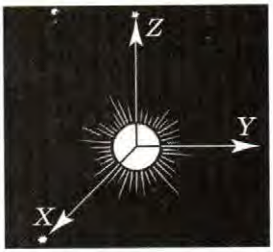


Рис. 2.28

Ускорение, обусловленное обращением Земли вокруг Солнца, очень мало, так как велик период обращения (год). Значительно больше (примерно в 6 раз) ускорение, возникающее из-за вращения Земли вокруг оси с периодом $T = 24$ ч. Но и оно невелико. На поверхности Земли у экватора, где это ускорение наибольшее, оно равно:

$$a = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{T}\right) R \approx 0{,}035 \text{ м/с},$$

т. е. составляет всего 0,35% от ускорения свободного падения $g = 9{,}8$ м/с^2. Именно поэтому систему

Вспомните, как изменяется ускорение свободного падения при перемещении точки наблюдения от полюса к экватору.

отсчёта, связанную с Землёй, можно лишь приближённо рассматривать как инерциальную.

Доказательство вращения Земли. Однако существуют явления, которые нельзя объяснить, если считать геоцентрическую систему отсчёта инерциальной. К ним относится вращение относительно Земли плоскости колебаний маятника в знаменитом опыте Фуко, доказывающем вращение Земли.

Интересно Впервые опыт с маятником был выполнен французским физиком-экспериментатором Жаном Фуко (1819—1868) в узком кругу. Его результаты заинтересовали Л. Бонапарта, и он предложил Фуко провести демонстрацию этого опыта в грандиозном масштабе под куполом Пантеона в Париже в присутствии множества зрителей. Эту публичную демонстрацию, устроенную в 1851 г., и принято называть опытом Фуко.

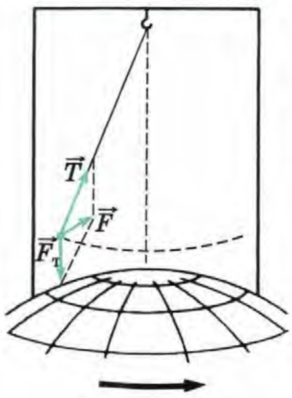


Рис. 2.29

Рассмотрим колебания маятника в гелиоцентрической инерциальной системе отсчёта. Для большей наглядности и простоты будем считать, что опыт проводится на полюсе.

Пусть в начальный момент маятник отклоняют от положения равновесия. Действующие на маятник сила притяжения к Земле $\vec{F}_т$ и сила упругости подвеса маятника $\vec{T}$ лежат в той же вертикальной плоскости (рис. 2.29). Согласно второму закону Ньютона ускорение маятника совпадает по направлению с равнодействующей силой $\vec{F}$ и поэтому лежит в той же вертикальной плоскости. А это значит, что с течением времени плоскость колебаний маятника в инерциальной системе отсчёта должна оставаться неизменной. Так и происходит в гелиоцентрической системе. Однако система отсчёта, связанная с Землёй, не является инерциальной, и относительно неё плоскость колебаний маятника поворачивается вследствие вращения Земли. Чтобы это обнаружить, необходимо подвес сделать таким, чтобы трение в нём было мало, а сам маятник — достаточно массивным. Иначе трение в подвесе заставит плоскость колебаний следовать за вращением Земли.

Смещение плоскости колебаний маятника относительно Земли становится заметным уже через несколько минут. На средних широтах колебания маятника будут выглядеть несколько сложнее, но суть явления не изменится.

Геоцентрическая система отсчёта. Маятник Фуко Найти

1. Какие системы отсчёта являются инерциальными? Сколько инерциальных систем отсчёта?
2. Мяч свободно падает. Будет ли связанная с ним система отсчёта инерциальной?
3. Как бы двигался маятник Фуко на экваторе?

§ 26 ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ. ИНВАРИАНТНЫЕ И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

В любой ли системе отсчёта свободное тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения?
Что утверждает первый закон Ньютона?

Галилей первым обратил внимание на то, что равномерное прямолинейное движение по отношению к Земле совершенно не сказывается на течении всех механических явлений.

Допустим, вы находитесь в каюте корабля или в вагоне поезда, движущегося плавно, без толчков. Вы можете спокойно играть в бадминтон или пинг-понг, как и на земле. Мяч или волан будет по отношению к стенам и полу перемещаться точно так же, как и по отношению к земле при игре в обычных условиях. Если не посмотреть в окно, то с уверенностью нельзя сказать, что же происходит с поездом: движется он или стоит.

Если в движущемся с постоянной скоростью вагоне изучать падение тел, колебания маятника и другие явления, то результаты будут точно такими же, как и при исследовании этих явлений на Земле.

Лишь при резком торможении поезда нужно прилагать дополнительные усилия, чтобы устоять на ногах. При большой болтанке самолёта или качке парохода на большой волне об игре с мячом не может быть и речи. Все предметы приходится закреплять, чтобы они оставались на своих местах.

Принцип относительности. На основании подобных наблюдений можно сформулировать один из самых фундаментальных законов природы — *принцип относительности*.

ВАЖНО Все механические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.

Это утверждение известно как *принцип относительности* в механике. Его ещё называют принципом относительности Галилея.

Не нужно думать, что выполнение принципа относительности означает полную тождественность движения одного и того же тела относительно различных инерциальных систем отсчёта. Тождественны лишь законы динамики. Законы движения тел определяются не только законами динамики, но и начальными скоростями и начальными координатами тел. А начальные величины для данного тела относительно разных систем отсчёта различны.

Покажите тождественность записи второго закона Ньютона относительно разных инерциальных систем отсчёта (используйте классический закон сложения скоростей).

Инвариантные и относительные величины. Инвариантность означает неизменность физической величины или закона при определённых преобразованиях или изменениях условий. Например, сила, с которой мяч ударяется о землю, не зависит от того, кто наблюдал этот удар: человек, стоящий рядом, или пассажир равномерно движущегося автобуса. Или, например, масса космонавта одинакова на Земле и на Луне. Отметим, какие из рассмотренных величин остаются инвариантными при движении тела относительно разных систем отсчёта.

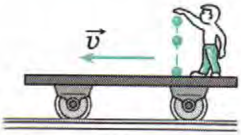


Рис. 2.30

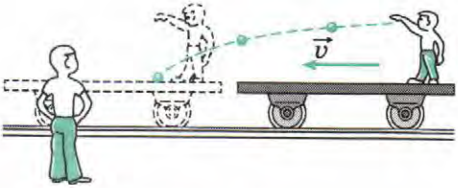


Рис. 2.31

Важно Инвариантными при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой являются ускорение, масса и сила. Также инвариантными будут законы Ньютона, о чём говорит принцип относительности Галилея.

В то же время уравнения движения тел в разных инерциальных системах отсчёта будут выглядеть по-разному.

Важно Величины, изменяющиеся при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой, являются относительными (неинвариантными). Кинематические величины, такие, как скорость, перемещение, траектория движения — примеры относительных величин.

Запишите уравнения движения: 1) пассажира, идущего вдоль вагона движущегося поезда, относительно вагона и относительно человека, стоящего на перроне; 2) машины, движущейся вдоль экватора, относительно Земли и Солнца.

Например, в равномерно движущемся поезде камень будет падать отвесно относительно стен вагона, если начальная скорость камня по отношению к поезду равна нулю (рис. 2.30). Но, с точки зрения наблюдателя на Земле этот камень будет двигаться по параболе (рис. 2.31). Дело в том, что начальная скорость камня по отношению к системе отсчёта, связанной с Землёй, отлична от нуля и равна скорости поезда.

Открытие принципа относительности — одно из величайших достижений человеческого разума. Оно оказалось возможным лишь после того, как люди поняли, что ни Земля, ни Солнце не является центром Вселенной.

Принцип относительности. Инвариантные и относительные величины Найти

1. Сформулируйте принцип относительности Галилея.
2. От каких физических величин зависит ускорение тела?
3. Является ли инвариантной величиной скорость тела?

Повторите материал главы 2 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

ГЛАВА 3 СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

В главе 2 мы ввели понятие силы как количественной меры действия одного тела на другое. В этой главе мы рассмотрим, какие силы рассматриваются в механике, чем определяются их значения.

§ 27 СИЛЫ В ПРИРОДЕ

Много ли видов сил существует в природе?
Перечислите известные вам силы. Какую природу они имеют — гравитационную или электромагнитную?

На первый взгляд кажется, что мы взялись за непосильную и неразрешимую задачу: тел на Земле и вне её бесконечное множество. Они взаимодействуют по-разному. Так, например, камень падает на Землю; электровоз тянет поезд; нога футболиста ударяет по мячу; потёртая о мех эбонитовая палочка притягивает лёгкие бумажки, магнит притягивает железные опилки; проводник с током поворачивает стрелку компаса; взаимодействуют Луна и Земля, а вместе они взаимодействуют с Солнцем; взаимодействуют звёзды и звёздные системы, луч света отражается от зеркала и т. д. Подобным примерам нет конца. Похоже, что в природе существует бесконечное множество взаимодействий (сил)? Оказывается, нет!

Четыре типа сил. В безграничных просторах Вселенной, на нашей планете, в любом веществе, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и в мире элементарных частиц мы встречаемся с проявлением всего лишь четырёх типов сил: гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых.

Важно **Гравитационные силы**, или силы всемирного тяготения, действуют между всеми телами, имеющими массу, — все тела притягиваются друг к другу.

Предположите, в каких случаях гравитационная сила может изменить траекторию движения Земли.

Но это притяжение существенно обычно лишь тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел так же велико, как Земля или Луна. Иначе эти силы столь малы, что ими можно пренебречь.

Важно **Электромагнитные силы** действуют между частицами, имеющими электрические заряды.

Попробуйте, зная, что все тела состоят из молекул, объяснить, почему силы упругости и трения имеют электромагнитную природу.

Сфера их действия особенно обширна и разнообразна. В атомах, молекулах, твёрдых, жидких и газообразных телах, живых организмах именно электромагнитные силы являются главными. Такие, казалось бы, чисто механические силы, как силы трения и упругости, имеют электромагнитную природу. Велика их роль в атомах.

Важно **Ядерные силы** действуют между частицами в атомных ядрах и определяют свойства ядер.

Расскажите одноклассникам, что вам известно о ядерных силах. Замечаете ли вы в быту проявление действия ядерных сил?

Область действия ядерных сил очень ограничена. Они заметны только внутри атомных ядер (т. е. на расстояниях порядка 10^{-15} м). Уже на расстояниях между частицами порядка 10^{-13} м (в тысячу раз меньших размеров атома — 10^{-10} м) они не проявляются совсем.

Важно **Слабые взаимодействия** вызывают взаимные превращения элементарных частиц, определяют радиоактивный распад ядер, реакции термоядерного синтеза.

Они проявляются на ещё меньших расстояниях, порядка 10^{-17} м.

Ядерные силы — самые мощные в природе. Если интенсивность ядерных сил принять за единицу, то интенсивность электромагнитных сил составит 10^{-2}, гравитационных — 10^{-40}, слабых взаимодействий — 10^{-16}.

Сильные (ядерные) и слабые взаимодействия проявляются на таких малых расстояниях, когда законы механики Ньютона, а с ними вместе и понятие механической силы теряют смысл.

Интересно Интенсивность сильного и слабого взаимодействий измеряется в *единицах энергии* (в электрон-вольтах), а не *единицах силы*, и потому применение к ним термина «сила» объясняется многовековой традицией все явления в окружающем мире объяснять действием характерных для каждого явления «сил».

В механике мы будем рассматривать только гравитационные и электромагнитные взаимодействия.

Силы в механике. В механике обычно имеют дело с тремя видами сил — силами тяготения, силами упругости и силами трения.

Гравитационные, электромагнитные, ядерные, слабые силы Найти

1. Силы какой природы рассматриваются в механике?
2. Назовите типы взаимодействий, существующих в природе.
3. Какие результаты взаимодействия тел мы наблюдаем?
4. Что такое интенсивность взаимодействия?

ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ

§ 28 СИЛА ТЯЖЕСТИ И СИЛА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Почему Луна движется вокруг Земли?
Что будет, если Луна остановится?
Почему планеты обращаются вокруг Солнца?

В главе 1 подробно говорилось о том, что земной шар сообщает всем телам у поверхности Земли одно и то же ускорение — ускорение свободного падения. Но если земной шар сообщает телу ускорение, то согласно второму закону Ньютона он действует на тело с некоторой силой. Силу, с которой Земля действует на тело, называют *силой тяжести*. Сначала найдём эту силу, а затем и рассмотрим силу всемирного тяготения.

Ускорение по модулю определяется из второго закона Ньютона:

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

В общем случае оно зависит от силы, действующей на тело, и его массы. Так как ускорение свободного падения не зависит от массы, то ясно, что сила тяжести должна быть пропорциональна массе:

$$\boxed{\vec{F} = m\vec{g}.} \tag{3.1}$$

Физическая величина $\vec{g}$ — ускорение свободного падения, оно постоянно для всех тел.

На основе формулы $F = mg$ можно указать простой и практически удобный метод измерения масс тел путём сравнения массы данного тела с эталоном единицы массы. Отношение масс двух тел равно отношению сил тяжести, действующих на тела:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{F_1}{F_2}. \tag{3.2}$$

Это значит, что

Важно массы тел одинаковы, если одинаковы действующие на них силы тяжести.

На этом основано определение масс путём взвешивания на пружинных или рычажных весах. Добиваясь того, чтобы сила давления тела на чашку весов, равная силе тяжести, приложенной к телу, была уравновешена силой давления гирь на другую чашку весов, равной силе тяжести, приложенной к гирям, мы тем самым определяем массу тела.

Сила всемирного тяготения. Ньютон был первым, кто строго доказал, что причина, вызывающая падение камня на Землю, движение Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца, одна и та же. Это *сила всемирного тяготения*, действующая между любыми телами Вселенной.

Интересно Сила тяжести, действующая на данное тело вблизи Земли, может считаться постоянной лишь на определённой широте у поверхности Земли. Если тело поднять или перенести в место с другой широтой, то ускорение свободного падения, а следовательно, и сила тяжести изменятся.

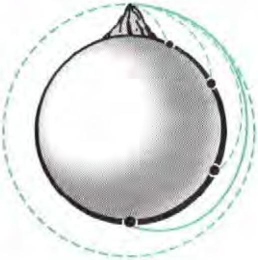


Рис. 3.1

Ньютон пришёл к выводу, что если бы не сопротивление воздуха, то траектория камня, брошенного с высокой горы (рис. 3.1) с определённой скоростью, могла бы стать такой, что он вообще никогда не достиг бы поверхности Земли, а двигался бы вокруг неё подобно тому, как планеты описывают в небесном пространстве свои орбиты.

Итак, по мнению Ньютона, движение Луны вокруг Земли или движение планет вокруг Солнца — это тоже свободное падение, которое длится, не прекращаясь, миллиарды лет. Причиной такого падения (идёт ли речь действительно о падении обычного камня на Землю или о движении планет по их орбитам) служит сила тяготения.

Земля сообщает Луне ускорение, которое не зависит от массы Луны и, как показали расчёты, в $(60)^2$ раз меньше ускорения тел на Земле. Расстояние до Луны в 60 раз больше радиуса Земли. Отсюда Ньютон сделал вывод, что ускорение и соответственно сила притяжения тел к Земле обратно пропорциональны квадрату расстояния до центра Земли: $a \sim \frac{1}{r^2}$, $F \sim \frac{1}{r^2}$.

Также Ньютон установил, что Солнце сообщает всем планетам ускорение, обратно пропорциональное квадрату расстояния от планет до Солнца.

Закон всемирного тяготения. Можно лишь догадываться о волнении, охватившем Ньютона, когда он пришёл к великому результату: одна и та же причина вызывает явления поразительно широкого диапазона — от падения брошенного камня на землю до движения огромных космических тел.

Ньютон нашёл эту причину и смог точно выразить её в виде одной формулы — закона всемирного тяготения.

Так как сила всемирного тяготения сообщает всем телам одно и то же ускорение независимо от их массы, то она должна быть пропорциональна массе того тела, на которое действует:

$$F = \frac{cm}{r^2} \qquad (3.3)$$

Интересно «Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них... все планеты тяготеют друг к другу...» И. Ньютон

Но поскольку, например, Земля действует на Луну с силой, пропорциональной массе Луны, то и Луна по третьему закону Ньютона должна действовать на Землю с той же силой. Причём эта сила должна быть пропорциональна массе Земли. Если сила тяготения является действительно универсальной, то со стороны данного тела на любое другое тело должна действовать сила, пропорциональная массе этого другого тела. Следовательно, сила всемирного тяготения должна быть пропорциональна произведению масс взаимодействующих тел. Отсюда вытекает формулировка *закона всемирного тяготения.*

Закон всемирного тяготения Сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}. \qquad (3.4)$$

Запомни Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**.

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая, если расстояние между ними равно 1 м. Ведь при массах $m_1 = m_2 = 1$ кг и расстоянии $r = 1$ м получаем $G = F$ (численно).

Нужно иметь в виду, что закон всемирного тяготения (3.4) как всеобщий закон справедлив для материальных точек. При этом силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль линии, соединяющей эти точки (рис. 3.2, *а*).

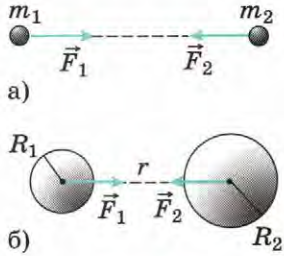


Рис. 3.2

Можно показать, что однородные тела, имеющие форму шара (даже если их нельзя считать материальными точками, рис. 3.2, *б*), также взаимодействуют с силой, определяемой формулой (3.4). В этом случае r — расстояние между центрами шаров. Силы взаимного притяжения лежат на прямой, проходящей через центры шаров. Такие силы называются *центральными*. Тела, падение которых на Землю мы обычно рассматриваем, имеют размеры, много меньшие, чем земной радиус ($R \approx 6400$ км). Такие тела можно, независимо от их формы, рассматривать как материальные точки и определять силу их притяжения к Земле с помощью закона (3.4), имея в виду, что r есть расстояние от данного тела до центра Земли.

Интересно «Брошенный на Землю камень отклонится под действием тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадёт наконец на Землю. Если его бросить с большей скоростью, то он упадёт дальше». И. Ньютон

Определение гравитационной постоянной. Теперь выясним, как можно найти гравитационную постоянную. Прежде всего заметим, что G имеет определённое наименование. Это обусловлено тем, что единицы (и соответственно наименования) всех величин, входящих в закон всемирного тяготения, уже были установлены ранее. Закон же тяготения даёт новую связь между известными величинами с определёнными наименованиями единиц. Именно поэтому коэффициент оказывается именованной величиной. Пользуясь формулой закона всемирного тяготения, легко найти наименование единицы гравитационной постоянной в СИ: Н $\cdot$ м^2/кг^2 = м^3/(кг $\cdot$ с^2).

Для количественного определения G нужно независимо определить все величины, входящие в закон всемирного тяготения: обе массы, силу и расстояние между телами.

Трудность состоит в том, что гравитационные силы между телами небольших масс крайне малы. Именно по этой причине мы не замечаем притяжение нашего тела к окружающим предметам и взаимное притяжение предметов друг к другу, хотя гравитационные силы — самые универсальные из всех сил в природе. Два человека массами по 60 кг на расстоянии 1 м друг от друга

Оцените силу гравитационного взаимодействия между вами и вашим соседом по парте. Считайте, что вы находитесь на расстоянии $r = 0,5$ м.

притягиваются с силой всего лишь порядка 10^{-9} Н. Поэтому для измерения гравитационной постоянной нужны достаточно тонкие опыты.

Впервые гравитационная постоянная была измерена английским физиком Г. Кавендишем в 1798 г. с помощью прибора, называемого крутильными весами. Схема крутильных весов показана на рисунке 3.3. На тонкой упругой нити подвешено лёгкое коромысло с двумя одинаковыми грузиками на концах. Рядом неподвижно закреплены два тяжёлых шара. Между грузиками и неподвижными шарами действуют силы тяготения. Под влиянием этих сил коромысло поворачивается и закручивает нить до тех пор, пока возникающая сила упругости не станет равна гравитационной силе. По углу закручивания можно определить силу притяжения. Для этого нужно только знать упругие свойства нити. Массы тел известны, а расстояние между центрами взаимодействующих тел можно непосредственно измерить.

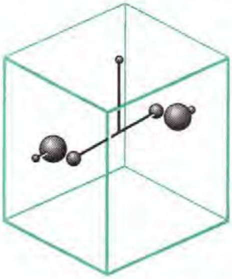


Рис. 3.3

Из этих опытов было получено следующее значение для гравитационной постоянной:

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

Предположите, какие трудности возникли бы у вас при попытке повторить опыт Кавендиша. Обсудите эту проблему с одноклассниками.

Лишь в том случае, когда взаимодействуют тела огромных масс (или по крайней мере масса одного из тел очень велика), сила тяготения достигает большого значения. Например, Земля и Луна притягиваются друг к другу с силой $F \approx 2 \cdot 10^{20}$ Н.

Зависимость ускорения свободного падения тел от географической широты. Одна из причин увеличения ускорения свободного падения при перемещении точки, где находится тело, от экватора к полюсам, состоит в том, что земной шар несколько сплюснут у полюсов и расстояние от центра Земли до её поверхности у полюсов меньше, чем на экваторе. Другой причиной является вращение Земли.

Равенство инертной и гравитационной масс. Самым поразительным свойством гравитационных сил является то, что они сообщают всем телам, независимо от их масс, одно и то же ускорение. Что бы вы сказали о футболисте, удар которого одинаково ускорял бы обыкновенный кожаный мяч и двухпудовую гирю? Каждый скажет, что это невозможно. А вот Земля является именно таким «необыкновенным футболистом» с той только разницей, что действие её на тела не носит характера кратковременного удара, а продолжается непрерывно миллиарды лет.

ИНТЕРЕСНО В теории Ньютона масса является источником поля тяготения. Мы находимся в поле тяготения Земли. В то же время мы также являемся источниками поля тяготения, но в силу того, что наша масса существенно меньше массы Земли, наше поле намного слабее и окружающие предметы на него не реагируют.

Необыкновенное свойство гравитационных сил, как мы уже говорили, объясняется тем, что эти силы пропорциональны массам обоих взаимодействующих тел. Масса тела, которая входит во второй закон Ньютона, определяет инертные свойства тела, т. е. его способность приобретать определённое ускорение под действием данной силы. Это *инертная масса* $m_и$.

Казалось бы, какое отношение она может иметь к способности тел притягивать друг друга? Масса, определяющая способность тел притягиваться друг к другу, — *гравитационная масса* $m_г$.

Из механики Ньютона совсем не следует, что инертная и гравитационная массы одинаковы, т. е. что

$$m_и = m_г. \quad (3.5)$$

Равенство (3.5) является непосредственным следствием из опыта. Оно означает, что можно говорить просто о массе тела как о количественной мере как инертных, так и гравитационных его свойств.

Силы тяжести, тяготения. Гравитационная и инертная массы   Найти

1. Справедлив ли закон всемирного тяготения для тел произвольной формы?
2. Какие силы называют центральными?
3. Каков физический смысл гравитационной постоянной?
4. От чего зависит ускорение свободного падения?
5. Как доказать, что инертная масса равна гравитационной?

А1. К каким двум телам массами m_1 и m_2 на расстоянии r друг от друга применим закон всемирного тяготения в форме $F = G\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$?

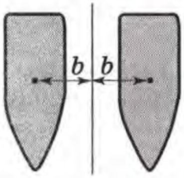
1) к любым телам при любых расстояниях между ними
2) только к небесным телам при больших расстояниях между ними
3) к любым телам с размерами, значительно меньшими расстояния r
4) только к телам шарообразной формы

А2. Расстояние между центрами двух шаров равно 1 м, масса каждого шара 1 кг. Сила всемирного тяготения между ними равна

1) 1 Н   2) 0,001 Н   3) $7 \cdot 10^{-5}$ Н   4) $7 \cdot 10^{-11}$ Н

А3. При увеличении в 3 раза расстояния между центрами шарообразных тел сила гравитационного притяжения

1) увеличивается в 3 раза   3) увеличивается в 9 раз
2) уменьшается в 3 раза   4) уменьшается в 9 раз



А4. По какой из приведённых формул можно рассчитать силу гравитационного притяжения между двумя кораблями одинаковой массы m (см. рис.)? Считайте, что b много больше размеров кораблей.

1) $F = Gm^2/b^2$ 3) $F = Gm^2/16b^2$
2) $F = Gm^2/4b^2$ 4) ни по одной из указанных формул

А5. Два маленьких шарика массой m каждый находится на расстоянии r друг от друга и притягиваются с силой F. Чему равна сила гравитационного притяжения двух других шариков, если масса каждого из них $m/2$, а расстояние между их центрами $2r$?

1) $F/2$ 2) $F/4$ 3) $F/8$ 4) $F/16$

§ 29 СИЛА ТЯЖЕСТИ НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ

Чем различаются сила тяжести и сила тяготения?
Что влияет на значение силы тяжести?

Сила тяжести возникает в результате взаимодействия тела с Землёй при учёте суточного вращения Земли.

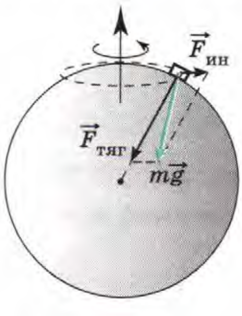


Рис. 3.4

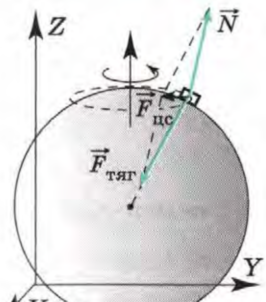


Рис. 3.5

Поясним, как влияет суточное вращение Земли на значение силы тяжести. Как мы знаем, Земля вращается вокруг собственной оси с периодом, равным 24 часам. Следовательно, система отсчёта, связанная с Землёй, является неинерциальной, и тело, находящееся на Земле, находится в неинерциальной системе отсчёта (рис. 3.4). Вследствие этого на тело действует, помимо силы тяготения, центробежная сила инерции, равная $m\omega^2 r$ и направленная от центра окружности, по которой вращается тело. Равнодействующая этих двух сил и будет силой тяжести, равной $\vec{F}_{тяж} = m\vec{g} = \vec{F}_{тяг} + m\vec{a}_{цс}$.

Ускорение свободного падения не направлено по радиусу к центру Земли, а направлено, как мы видим, под углом к этому радиусу. Центростремительное ускорение зависит от радиуса окружности, по которой движется тело, следовательно, сила тяжести и ускорение свободного падения зависят от широты местности. На полюсе ускорение свободного падения максимально и равно 9,83 м/с^2, а на экваторе минимально и равно 9,78 м/с^2.

Очевидно, что учитывать зависимость силы тяжести от широты местности имеет смысл, когда мы делаем расчёты с точностью до четырёх значащих цифр, т. е. когда в данных задачи 4 цифры отличны от нуля, например масса равна 1,321 кг, обычно же достаточно считать ускорение на поверхности Земли равным 9,8 м/с^2, а иногда это значение мы округляем и считаем равным 10 м/с^2.

Рассмотрим движение тела относительно инерциальной системы отсчёта, например системы, связанной со звёздами (рис. 3.5).

Запишем согласно второму закону Ньютона уравнение движения тела $m\vec{a}_{цс} = \vec{F}_{тяг} + \vec{N}$, где $\vec{N}$ — сила нормального давления. В состоянии покоя сила тяжести по модулю равна силе нормального давления и направлена в противоположную сторону $\vec{F}_{тяж} = -\vec{N}$, отсюда следует, что $\vec{F}_{тяж} = \vec{F}_{тяг} + m\vec{a}_{цс}$.

Сила тяжести зависит также от высоты подъёма тела над уровнем моря. Так как согласно закону всемирного тяготения $F_{тяж} = F_{тяг} = G\dfrac{mM_З}{R^2}$, то после преобразований можно получить, что сила тяжести, действую-

> Что влияет на силу тяжести, действующую на тела, находящиеся на Луне? Обсудите эту проблему с одноклассниками.

щая на тело, находящееся на расстоянии h над поверхностью Земли, равна

$$F_{\text{тяж}h} = G\frac{mM_З}{(R+h)^2} = F_{\text{тяж}}\left(\frac{R}{R+h}\right)^2.$$

По таблице значений масс и радиусов планет Солнечной системы оцените, на какой из планет сила тяжести отличается от силы тяжести, действующей на тело на Земле наиболее существенно. При этом рассматривайте тело, находящееся на полюсе, чтобы исключить влияние на значение силы тяжести вращения планеты.

На Луне и других планетах сила тяжести отличается от силы тяжести на Земле, так как изменяется сила тяготения. Сила тяготения, как мы видели, определяется массой планеты и её радиусом. Масса и радиус Луны меньше, чем масса и радиус Земли, поэтому сила тяжести на Луне существенно меньше. Так, на тело массой 1 кг на Луне действует сила тяжести, равная 1,7 Н.

Рассчитаем силу тяжести, действующую на тело массой 1 кг, находящееся на поверхности Венеры, при этом пренебрежём влиянием вращения Венеры вокруг собственной оси. Это можно сделать потому, что период вращения Венеры вокруг собственной оси почти в 10 раз больше, чем аналогичный период вращения Земли. Масса Венеры $M_В = 0{,}82M_З$, радиус $R_В = 0{,}95\ R_З$.

Тогда $F_{\text{тяж}В} = F_{\text{тяг}} = G\dfrac{mM_В}{R_В^2} = G\dfrac{m0{,}82M_З}{(0{,}95)^2R_З^2} \approx 0{,}91F_{\text{тяж}З}$.

Можно ли утверждать, что ускорение свободного падения на Венере будет точно равно приведённому в тексте значению? Что ещё влияет на значение ускорения свободного падения?

Соответственно и ускорение свободного падения на Венере равно $g_В = 0{,}91g_З \approx 8{,}9$ м/с^2.

Таким образом, ускорение свободного падения на Венере несущественно отличается от ускорения свободно падения на Земле.

Если рассматривать другие планеты, например Марс, то сила тяжести на Марсе уже существенно отличается от силы тяжести, действующей на то же тело на Земле. Радиус Марса равен 0,53 радиуса Земли, а масса — 0,11 массы Земли. Следовательно, $F_{\text{тяж}М} = F_{\text{тяг}} = G\dfrac{mM_М}{R_М^2} = G\dfrac{m0{,}11M_З}{(0{,}53)^2R_З^2} \approx 0{,}39F_{\text{тяж}З}$.

Таким образом, ускорение свободного падения на Марсе приблизительно равно 3,8 м/с^2.

Сила тяжести. Сила тяготения — Найти

1. Где на планете, вращающейся относительно собственной оси, сила тяжести максимальна?
2. Как определить силу тяжести на планете, зная массу планеты и массу тела?
3. Космонавт, находясь на Земле, притягивается к ней с силой 700 Н. С какой силой он будет притягиваться к Марсу, находясь на его поверхности, если радиус Марса примерно в 2 раза, а масса в 10 раз меньше, чем у Земли?
4. Планета имеет радиус, в 2 раза меньший радиуса Земли. Известно, что ускорение свободного падения на поверхности этой планеты такое же, как на Земле. Чему равно отношение массы этой планеты к массе Земли?

§ 30 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ»

При решении задач надо помнить, что сила тяготения действует между любыми телами, имеющими массу, но формула $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ справедлива только для тел, которые можно считать материальными точками, а также для однородных тел шаровой формы. При этом расстояние r — это расстояние между центрами шаров.

Задача 1. При опытной проверке закона всемирного тяготения сила взаимодействия между двумя свинцовыми шарами массами $m_1 = 5$ кг и $m_2 = 500$ г, расстояние между центрами которых $r = 7$ см, оказалась равной $F = 34$ нН. Вычислите по этим данным гравитационную постоянную.

Решение. Согласно закону всемирного тяготения $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$. Из этого выражения следует, что $G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2}$. Подставим в эту формулу результаты опыта, при этом все данные переведём в СИ: $m_2 = 500$ г $= 5 \cdot 10^{-1}$ кг, $r = 7$ см $= 7 \cdot 10^{-2}$ м, $F = 34$ нН $= 3{,}4 \cdot 10^{-8}$ Н.

Получим $G = 6{,}66 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Уточнённое значение гравитационной постоянной, которое входит в таблицы: $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$.

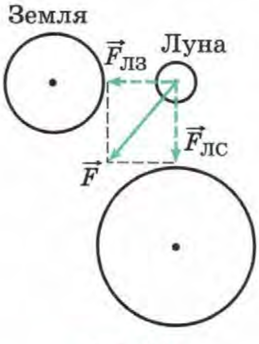


Рис. 3.6

Задача 2. Определите равнодействующую силу, действующую на Луну, считая, что силы притяжения к Земле и Солнцу взаимно перпендикулярны. Массы Луны, Земли и Солнца соответственно равны $m_Л = 7{,}36 \cdot 10^{22}$ кг; $m_З = 5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг; $m_С = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг; расстояния от Луны до Земли и от Луны до Солнца соответственно равны $r_{ЛЗ} = 3{,}85 \cdot 10^8$ м, $r_{ЛС} = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ м.

Решение. По условию задачи силы гравитационного притяжения Луны к Земле и Солнцу взаимно перпендикулярны (рис. 3.6). Рассчитаем силу гравитационного притяжения Луны к Земле.

$$F_{ЛЗ} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 7{,}36 \cdot 10^{22} \cdot 5{,}98 \cdot 10^{24}}{(3{,}85 \cdot 10^8)^2}\ (\text{Н}) = 1{,}98 \cdot 10^{20}\ \text{Н}.$$

Сила притяжения Луны к Солнцу равна

$$F_{ЛС} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 7{,}36 \cdot 10^{22} \cdot 1{,}99 \cdot 10^{30}}{(1{,}5 \cdot 10^{11})^2}\ (\text{Н}) = 4{,}34 \cdot 10^{20}\ \text{Н}.$$

По теореме Пифагора найдём равнодействующую силу, действующую на Луну, $F = \sqrt{F_{ЛЗ}^2 + F_{ЛС}^2} = 4{,}77 \cdot 10^{20}$ Н.

Задача 3. На поверхности Земли находятся два свинцовых шара радиусом $R = 10$ см каждый. В одном из них вырезана сферическая полость, как показано на рисунке 3.7. Радиус полости $r = 5$ см, центр полости находится на расстоянии $l = 5$ см от центра шара. Определите силу гравитационного притяжения шаров. Центры шаров находятся на расстоянии $L = 40$ см.

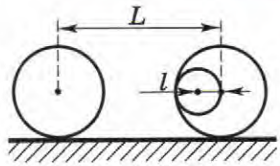


Рис. 3.7

Решение. Если бы у правого шара не было вырезанной полости, то сила гравитационного притяжения шаров была бы равна $F_1 = G\dfrac{m^2}{L^2}$, при этом $m = \rho\dfrac{4}{3}\pi R^3$. Вырезав полость, мы уменьшаем эту силу притяжения на силу F_2, равную силе притяжения левого шара к вырезанной части:

$$F_2 = G\frac{mm_1}{(L-r)^2}, \text{ где } m_1 = \rho\frac{4}{3}\pi r^3,\ l = r.$$

Тогда

$$F = F_1 - F_2 = G\frac{m^2}{L^2} - G\frac{mm_1}{(L-r)^2}. \qquad (1)$$

Заметим, что $L = 4R = 8r$; $R = 2r$, соответственно $m = 8\ m_1$. Подставив эти выражения в формулу (1), получим

$$F = G\frac{64m_1^2}{64r^2} - G\frac{8m_1^2}{49r^2} = G\frac{41m_1^2}{49r^2}.$$

Учтя, что $m_1 = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$, получаем $F = G\dfrac{164\rho\pi r}{147} = 1{,}32\cdot 10^{-7}$ Н.

Задачи для самостоятельного решения

1. Радиус R_1 Луны примерно в 3,7 раза меньше, чем радиус R Земли, а масса m Луны в 81 раз меньше массы M Земли. Определите ускорение свободного падения тел на поверхности Луны.

2. Предположим, что масса Земли стала в 2 раза, а радиус — в 1,2 раза больше. Определите, во сколько раз изменилась сила тяжести, действующая на тело, находящееся на полюсе.

C1. Какое ускорение сообщает Солнце Земле своим притяжением? Расстояние до Солнца примерно в 24 000 раз больше, чем радиус Земли, а масса Солнца превышает массу Земли в 333 000 раз. ($g_з = 10$ м/с^2.)

C2. Вычислите ускорение Луны, движущейся вокруг Земли по окружности. Расстояние между центрами Земли и Луны примите равным 400 000 км. Радиус Земли 6400 км. ($g_з = 10$ м/с^2.)

C3. Отношение массы Венеры к массе Земли равно 0,82, а отношение среднего радиуса Венеры к среднему радиусу Земли равно 0,95. Чему равна сила тяжести спускаемого на Венеру аппарата массой 500 кг? ($g_з = 10$ м/с^2.)

§ 31 ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

Что такое искусственные спутники Земли?
Какое назначение они имеют?

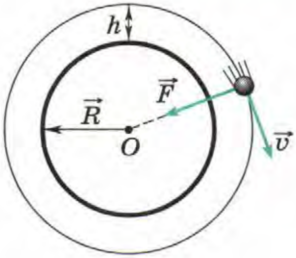


Рис. 3.8

Вычислим скорость, которую надо сообщить искусственному спутнику Земли, чтобы он двигался по круговой орбите на высоте h над Землёй.

На больших высотах воздух сильно разрежен и оказывает незначительное сопротивление движущимся в нём телам. Поэтому можно считать, что на спутник массой m действует только гравитационная сила $\vec{F}$, направленная к центру Земли (рис. 3.8).

Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a}_{цс} = \vec{F}$.

Центростремительное ускорение спутника определяется формулой $a_{цс} = \frac{v^2}{R + h}$, где h — высота спутника над поверхностью Земли. Сила же, действующая на спутник, согласно закону всемирного тяготения определяется формулой $F = G\frac{mM}{(R + h)^2}$, где M — масса Земли.

Подставив найденные выражения для F и a в уравнение для второго закона Ньютона, получим $\frac{mv^2}{R + h} = G\frac{mM}{(R + h)^2}$.

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R + h}}. \tag{3.6}$$

Из полученной формулы следует, что скорость спутника зависит от его расстояния от поверхности Земли: чем больше это расстояние, тем с меньшей скоростью он будет двигаться по круговой орбите. Примечательно то, что эта скорость не зависит от массы спутника. Значит, спутником Земли может стать любое тело, если ему сообщить определённую скорость. В частности, при $h = 2000$ км $= 2 \cdot 10^6$ м скорость $v \approx 6900$ м/с.

Запомни Минимальная скорость, которую надо сообщить телу на поверхности Земли, чтобы оно стало спутником Земли, движущимся по круговой орбите, называется **первой космической скоростью**.

Первую космическую скорость можно найти по формуле (3.6), если принять $h = 0$:

$$v_1 = \sqrt{G\frac{M}{R}}. \tag{3.7}$$

Подставив в формулу (3.7) значение G и значения величин M и R для Земли, можно вычислить первую космическую скорость для спутника Земли:

$$\boxed{v_1 \approx 8 \text{ км/с.}}$$

Докажите, что первую космическую скорость можно рассчитать по формуле $v_1 = \sqrt{gR}$.

Если такую скорость сообщить телу в горизонтальном направлении у поверхности Земли, то при отсутствии атмосферы оно станет искусственным спутником Земли, обращающимся вокруг неё по круговой орбите.

Такую скорость спутникам способны сообщать только достаточно мощные космические ракеты. В настоящее время вокруг Земли обращаются тысячи искусственных спутников.

Интересно

Первый советский космический корабль был запущен 15 мая 1960 г. со скоростью, близкой к первой космической скорости, и выведен на орбиту, близкую к круговой. Космический корабль «Восток», на борту которого советский космонавт Ю. Гагарин 12 апреля 1961 г. совершил первый в мире полёт в космос, двигался по эллиптической орбите. Максимальная скорость его полёта была 7843 м/с, минимальная скорость для данной орбиты составляла 7671 м/с.

Любое тело может стать искусственным спутником другого тела (планеты), если сообщить ему необходимую скорость.

Первая космическая скорость | Найти

1. Что определяет первую космическую скорость?
2. Какие силы действуют на спутник любой планеты?
3. Можно ли сказать, что Земля — спутник Солнца?
4. Выведите выражение для периода обращения спутника планеты.
5. Как изменяется скорость космического корабля при входе в плотные слои атмосферы? Нет ли противоречий с формулой (3.6)?

A1. Какое выражение определяет значение скорости движения по круговой орбите спутника планеты массой M, если радиус планеты R, а расстояние от поверхности планеты до спутника h?

1) $\sqrt{\dfrac{GM}{2R}}$ 2) $\sqrt{\dfrac{GM}{R+h}}$ 3) $\sqrt{\dfrac{GM}{2(R+h)}}$ 4) $\sqrt{\dfrac{GM}{(R+h)^2}}$

A2. Космический корабль движется вокруг Земли по круговой орбите радиусом 20 000 км. Масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг. Определите скорость корабля.

1) 4,5 км/с 2) 6,3 км/с 3) 8 км/с 4) 11 км/с

A3. Чему равна первая космическая скорость на Луне, если ускорение свободного падения на ней примерно в 6 раз меньше, чем на Земле, а радиус Луны в 3,7 раза меньше радиуса Земли. ($g_З = 9{,}8$ м/с^2.)

1) 46 км/с 2) 13 км/с 3) 7,6 км/с 4) 1,7 км/с

§ 32 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ»

Для решения задач требуется знать закон всемирного тяготения, закон Ньютона, а также связь линейной скорости тел с периодом их обращения вокруг планет. Обратите внимание на то, что радиус траектории спутника всегда отсчитывается от центра планеты.

Задача 1. Вычислите первую космическую скорость для Солнца. Масса Солнца $2 \cdot 10^{30}$ кг, диаметр Солнца $1{,}4 \cdot 10^{9}$ м.

Решение. Спутник движется вокруг Солнца под действием единственной силы — силы тяготения. Согласно второму закону Ньютона запишем:

$$\frac{mv_1^2}{R_С} = G\frac{mM}{R_С^2}.$$

Из этого уравнения определим первую космическую скорость, т. е. минимальную скорость, с которой надо запустить тело с поверхности Солнца, чтобы оно стало его спутником:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R_С}} \approx 437 \text{ км/с}.$$

Задача 2. Вокруг планеты на расстоянии 200 км от её поверхности со скоростью 4 км/с движется спутник. Определите плотность планеты, если её радиус равен двум радиусам Земли ($R_{пл} = 2R_З$).

Решение. Планеты имеют форму шара, объём которого можно вычислить по формуле $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, тогда плотность планеты

$$\rho_{пл} = \frac{M_{пл}}{V_{пл}} = \frac{M_{пл}}{\frac{4}{3}\pi R_{пл}^3}, \qquad (1)$$

где $M_{пл}$ — масса планеты, $R_{пл}$ — её радиус.

Спутник движется вокруг планеты по круговой орбите. На него действует сила тяготения $F_{тяг}$, которая определяет центростремительное ускорение. Согласно второму закону Ньютона

$$ma_{цс} = F_{тяг}, \text{ или } \frac{mv^2}{(R_{пл} + h)} = G\frac{mM_{пл}}{(R_{пл} + h)^2}.$$

Из последнего уравнения находим массу планеты: $M_{пл} = \frac{v^2(R_{пл} + h)}{G}$.

Подставив это выражение в формулу (1), имеем

$$\rho_{пл} = \frac{v^2(R_{пл} + h)}{\frac{4}{3}\pi R_{пл}^3 G} = \frac{v^2(2R_З + h)}{\frac{32}{3}\pi R_З^3 G} \approx 355 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 3. При какой скорости спутника период его обращения вокруг Земли равен двум суткам?

Р е ш е н и е. Скорость спутника

$$v = \frac{2\pi(R_З + h)}{T}, \quad (1)$$

где h — высота спутника над поверхностью Земли.

Для определения скорости необходимо знать высоту h.

Спутник движется по круговой орбите, при этом сила тяготения является центростремительной силой. Согласно второму закону Ньютона для спутника запишем:

$$ma_{цс} = F_{тяг}, \text{ или } \frac{mv^2}{(R_З + h)} = G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2}, \quad (2)$$

где m — масса спутника.

Из уравнения (2) находим высоту $h = \frac{GM_З}{v^2} - R_З$. Подставим выражение для h в формулу (1) и из полученного уравнения определим искомую скорость:

$$v = \frac{2\pi\left(R_З + \frac{GM_З}{v^2} - R_З\right)}{T} = \frac{2\pi GM_З}{v^2 T}.$$

Окончательно получим

$$v = \sqrt[3]{\frac{2\pi GM_З}{T}}. \quad (3)$$

Для упрощения расчётов поместим спутник на полюс, где сила тяжести равна силе тяготения. Тогда $mg = G\frac{mM_З}{R_З^2}$, отсюда $GM_З = gR_З^2$.

Подставив найденное выражение в формулу (3), определим скорость:

$$v = \sqrt[3]{\frac{2\pi g R_З^2}{T}} \approx 2{,}4 \text{ км/с}.$$

Задача 4. Определите среднее расстояние от Сатурна до Солнца, если период обращения Сатурна вокруг Солнца равен 29,5 лет. Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{30}$ кг.

Р е ш е н и е. Считаем, что Сатурн движется вокруг Солнца по круговой орбите. Тогда согласно второму закону Ньютона запишем:

$$\frac{mv^2}{r} = G\frac{mM_С}{r^2}, \quad (4)$$

где m — масса Сатурна, r — расстояние от Сатурна до Солнца, $M_С$ — масса Солнца.

Период обращения Сатурна $T = \frac{2\pi r}{v}$, отсюда $v = \frac{2\pi r}{T}$.

Подставив выражение для скорости v в уравнение (4), получим $\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = G\frac{M_С}{r}$.

Из последнего уравнения определим искомое расстояние от Сатурна до Солнца: $r = \sqrt[3]{\frac{GM_С T^2}{4\pi^2}} = 1{,}42 \cdot 10^{12}$ м.

Сравнив с табличными данными, убедимся в правильности найденного значения.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите длительность года на Венере. Среднее расстояние от Венеры до Солнца $1{,}08 \cdot 10^8$ км, а от Земли до Солнца $1{,}49 \cdot 10^8$ км.

2. Какой импульс силы подействовал на спутник массой 1 т, если спутник перешёл с орбиты радиусом $R_З + h$ на орбиту радиусом $R_З + 2h$, где высота h равна 200 км?

3. Астероид вращается вокруг Солнца с периодом, равным 410 сут. Определите расстояние от астероида до Солнца.

C1. Чему равен радиус кольца Сатурна, в котором частицы движутся со скоростью 10 км/с? Масса Сатурна $5{,}7 \cdot 10^{26}$ кг.

C2. Среднее расстояние от планеты Земля до Солнца составляет 149,6 млн км, а от планеты Юпитер до Солнца — 778,3 млн км. Чему равно отношение $v_З/v_Ю$ линейных скоростей этих двух планет при их движении вокруг Солнца, если считать их орбиты окружностями?

C3. Среднее расстояние от Солнца до планеты Уран составляет 2875,03 млн км, а до планеты Земля — 149,6 млн км. Чему приблизительно равна средняя линейная скорость планеты Уран при её движении вокруг Солнца, если известно, что средняя скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца составляет 30 км/с?

C4. Средняя плотность некоторой планеты равна средней плотности планеты Земля, а радиус этой планеты в 2 раза больше радиуса Земли. Определите отношение первой космической скорости на этой планете к первой космической скорости на Земле $v_п/v_З$.

C5. С какой скоростью движутся частицы, входящие в наиболее плотное кольцо Сатурна, если известно, что период их обращения примерно совпадает с периодом вращения Сатурна вокруг своей оси и составляет 10 ч 40 мин? Масса Сатурна равна $5{,}7 \cdot 10^{26}$ кг.

§ 33 ВЕС. НЕВЕСОМОСТЬ

Вспомните определение силы тяжести. Может ли она исчезнуть?

Как мы знаем, силой тяжести называют силу, с которой Земля притягивает тело, находящееся на её поверхности или вблизи этой поверхности.

Запомни **Весом тела** называют силу, с которой это тело действует на горизонтальную опору или растягивает подвес.

Вес не является силой какой-то специфической природы. Это название присвоено частному случаю проявления силы упругости.

Вес действует непосредственно на чашку пружинных весов и растягивает пружину; под действием этой силы поворачивается коромысло рычажных весов. Поясним сказанное простым примером.

Пусть тело A находится на горизонтальной опоре B (рис. 3.9), которой может служить чашка весов. Силу тяжести обозначим через $\vec{F}$, а силу давления тела на опору (вес) — через $\vec{F_1}$. Модуль силы реакции опоры $\vec{N}$ равен модулю веса $\vec{F_1}$ согласно третьему закону Ньютона. Сила $\vec{N}$ направлена в сторону, противоположную весу $\vec{F_1}$. Сила реакции опоры приложена не к опоре, а к находящемуся на ней телу.

В то время как сила тяжести $\vec{F}$ обусловлена взаимодействием тела с Землёй, вес $\vec{F_1}$ появляется в результате совсем другого взаимодействия — взаимодействия тела A и опоры B. Поэтому вес обладает особенностями, существенно отличающими его от силы тяжести.

Важно Важнейшей особенностью веса является то, что его значение зависит от ускорения, с которым движется опора.

При перенесении тел с полюса на экватор их вес изменяется, так как вследствие суточного вращения Земли весы с телом имеют на экваторе центростремительное ускорение. По второму закону Ньютона для тела, находящегося на экваторе, имеем $m\omega^2 R = G\dfrac{mM_З}{R^2} - N$, где N — сила реакции опоры, равная весу тела. Отсюда $N = G\dfrac{mM_З}{R^2} - m\omega^2 R$.

На полюсе вес тела равен силе тяготения. Очевидно, что на полюсе вес тела больше, чем на экваторе.

Остановимся на более простом случае. Пусть тело находится на чашке пружинных весов в лифте, движущемся с ускорением $\vec{a}$. Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{N}$, где m — масса тела.

Координатную ось OY системы отсчёта, связанной с Землёй, направим вертикально вниз. Запишем уравнение

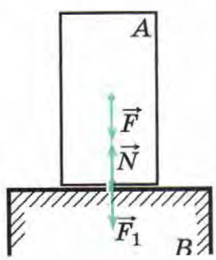


Рис. 3.9

Приведите своё тело в состояние невесомости. Для этого просто подпрыгните. В течение небольшого промежутка времени, пока на ваше тело действует только сила тяжести, вы будете находиться в состоянии невесомости совершенно так же, как космонавты в космическом корабле.

Одинакова ли природа невесомости у тел, находящихся в лифте, и у тел, находящихся в спутнике?

движения тела в проекции на эту ось: $ma_y = F_y + N_y$. Если ускорение направлено вниз, то, выражая проекции векторов через их модули, получаем $ma = F - N$. Так как $N = F_1$, то $ma = F - F_1$. Отсюда ясно, что лишь при $a = 0$ вес равен силе, с которой тело притягивается к Земле ($F_1 = F$). Если $a \neq 0$, то $F_1 = F - ma = m(g - a)$. Вес тела зависит от ускорения, с которым движется опора, и появление этого ускорения эквивалентно изменению ускорения свободного падения. Если, например, заставить лифт падать свободно, т. е. $a = g$, то $F_1 = m(g - g) = 0$, тело находится в состоянии невесомости.

Наступление у тел состояния невесомости означает, что тела не давят на опору и, следовательно, на них не действует сила реакции опоры, они движутся только под действием силы притяжения к Земле.

Важно Механическая сущность невесомости состоит в том, что в системе отсчёта, движущейся относительно Земли с ускорением свободного падения, исчезают все явления, которые на Земле обусловлены силой тяжести.

Многократно проводились опыты, в которых создавалось состояние невесомости. Например, самолёт разгоняется и начиная с некоторого момента движется строго по параболе, той, которая была бы в отсутствие воздуха. В кабине при этом наблюдаются необыкновенные явления: маятник замирает в отклонённом положении, выплеснутая из стакана вода большой сферической каплей повисает в воздухе, и рядом с ней застывают, будто подвешенные на невидимых нитях, все остальные предметы независимо от их массы и формы.

То же самое происходит и в кабине космического корабля при движении его по орбите. На большой высоте над Землёй почти нет воздуха, так что не надо его сопротивление компенсировать работой двигателей. Да и полёт длится не минуту, а многие сутки.

Вес. Невесомость | Найти

1. Что называют состоянием невесомости?
2. Что называется весом тела?
3. Будет ли парашютист во время прыжка находиться в состоянии невесомости?

А1. На полу лифта, движущегося с постоянным ускорением $\vec{a}$, направленным вертикально вверх, лежит груз массой m. Чему равен вес этого груза?

1) mg 2) 0 3) $m(g + a)$ 4) $m(g - a)$

А2. Автомобиль массой 1000 кг едет по выпуклому мосту с радиусом кривизны 40 м. Какую скорость должен иметь автомобиль в верхней точке моста, чтобы пассажиры в этой точке почувствовали состояние невесомости?

1) 0,05 м/с 2) 20 м/с 3) 25 м/с 4) 400 м/с

СИЛЫ УПРУГОСТИ

§ 34 ДЕФОРМАЦИЯ И СИЛЫ УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА

Вспомните, какие виды деформации вы знаете.
При каких условиях возникает деформация тела?

Силы тяготения действуют между телами всегда. Не нужно заботиться о том, чтобы привести эти силы в действие, и нет возможности их уничтожить, их можно только скомпенсировать. А вот силы упругости возникают при деформации тел и исчезают, когда она прекращается.

Запомни Под **деформацией** понимают изменение объёма или формы тела.

Для того чтобы различные тела или части одного и того же тела взаимодействовали посредством сил упругости, необходимо определённое условие: тела должны быть деформированы.

Силы упругости возникают только при деформации тел. Значения сил упругости обычно определяются изменениями длины и формы тела.

Для того чтобы резиновый шнур или пружина действовали с некоторой силой на ваши руки, эти тела нужно предварительно растянуть, т. е. деформировать (рис. 3.10). Чтобы упругая сетка батута подбросила акробата, её нужно предварительно прогнуть (рис. 3.11). Такой прогиб возникает при прыжке на сетку с некоторой высоты. При исчезновении деформации одновременно исчезают и силы упругости.

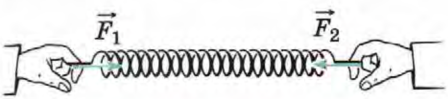


Рис. 3.10

При изменении объёма или формы твёрдых тел возникают силы упругости, препятствующие этим изменениям.

Жидкости форму не сохраняют. Вы можете перелить воду из графина в стакан, и это не вызовет появления сил упругости. Однако силы упругости возникают всегда при попытке изменить объём жидкости или газа.

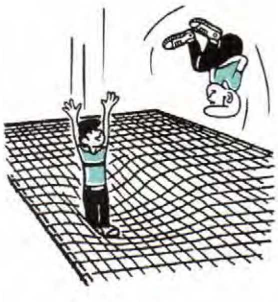


Рис. 3.11

Рассмотрим пружину, находящуюся на идеально гладком столе и одним концом прикреплённую к бруску. Под действием внешней силы $\vec{F}$ пружина, обладающая массой, оказывается растянутой неодинаково по длине. Больше будут растянуты те участки, которые расположены ближе к месту,

Попробуйте сжать жидкость хотя бы внутри велосипедного насоса или просто в бутылке. Легко ли сделать это?

Понаблюдайте, как деформируется мяч при падении на землю. Когда силы упругости максимальны?

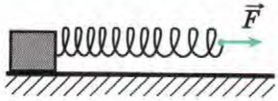


Рис. 3.12

где приложена сила $\vec{F}$ (рис. 3.12). Ведь здесь сила упругости крайнего правого участка пружины должна сообщить ускорение всей системе — телу и пружине, а сила упругости вблизи противоположного (левого) конца сообщает то же самое ускорение лишь телу. Если массой пружины можно пренебречь (т. е. если она мала по сравнению с массой тела), то деформация всех участков пружины будет одинакова. Точно так же при торможении быстро движущегося тела с помощью силы, приложенной к одному из участков поверхности тела, возникают деформация и сила упругости.

Закон Гука. При малых изменениях формы и объёма тела связь силы упругости тела с этими изменениями проста. Она была установлена экспериментально английским естествоиспытателем, учёным-энциклопедистом Робертом Гуком, современником Исаака Ньютона.

Запомни **Упругой** называется деформация, при которой тело восстанавливает свои первоначальные размеры и форму, как только прекращается действие силы, вызвавшей эту деформацию.

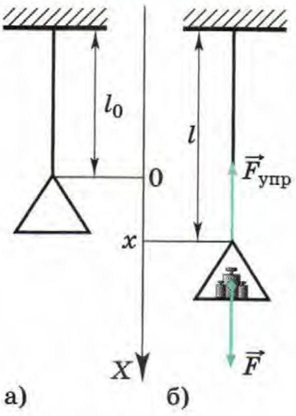


Рис. 3.13

Закон Гука для упругой деформации растяжения нетрудно установить, наблюдая растяжение резинового шнура под действием приложенной к его концу силы.

Пусть длина шнура с подвешенной к нему чашкой равна l_0 (рис. 3.13, *а*). Координатную ось X направим вдоль шнура вертикально вниз. Начало отсчёта выберем на уровне нижнего конца шнура, когда он находится в начальном состоянии. Под действием приложенной к шнуру силы, равной весу чашки с находящимися на ней гирьками, его длина станет равной l, а координата нижнего конца шнура примет значение x (рис. 3.13, *б*).

Обозначим удлинение шнура через Δl:

$$\Delta l = l - l_0 = x. \qquad (3.8)$$

Меняя число гирек, можно заметить, что сила упругости, равная силе тяжести, прямо пропорциональна изменению длины шнура. В этом и состоит *закон Гука.*

Важно При равновесии сила упругости растянутого шнура уравновешивает силу тяжести, действующую на чашку с гирьками.

Закон Гука При упругой деформации растяжения или сжатия модуль силы упругости прямо пропорционален модулю изменения длины тела:

$$F = k|\Delta l| = k|x|. \qquad (3.9)$$

Проведите с товарищем по парте опыт. Возьмите пружину, подвесьте её и проверьте закон Гука. Разработайте схему проведения этого опыта самостоятельно.

Запомни Коэффициент пропорциональности k называют **коэффициентом упругости** или **жёсткостью**.

Учитывая, что координата x и проекция силы упругости деформированного тела F_x на ось X имеют противоположные знаки, можно также записать:

$$\boxed{F_x = -kx.} \quad (3.10)$$

Эта закономерность хорошо выполняется только при упругих деформациях, при которых удлинение x тела мало. Она наблюдается при растяжении стержней из стали, чугуна, алюминия и других твёрдых упругих тел. Закону Гука подчиняется также деформация упругой пружины.

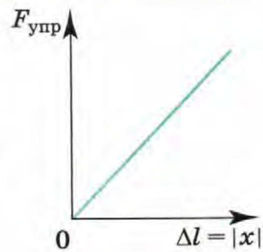


Рис. 3.14

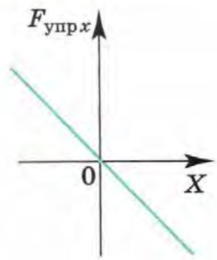


Рис. 3.15

Определите опытным путём предел прочности аптечной резинки, подвешивая к ней разные грузы.

На рисунке 3.14 показана зависимость модуля силы упругости деформированного тела от абсолютного значения его растяжения $|x|$, а на рисунке 3.15 — зависимость проекции силы упругости F_x того же тела от значения x.

Деформация. Сила упругости. Закон Гука — Найти

1. При каком условии появляются силы упругости?
2. При каких условиях выполняется закон Гука?
3. Объясните, почему рессоры уменьшают тряску автомобиля.

А1. Ученик измеряет силу кисти своей руки с помощью пружинного силомера. При этом используется способность силы

А. изменять скорость тела

Б. вызывать деформацию

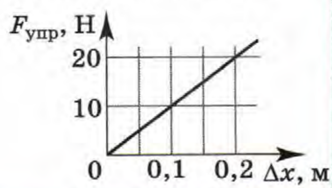
1) только А 2) только Б 3) и А, и Б 4) ни А, ни Б

А2. Пружина жёсткостью $k = 10^4$ Н/м под действием силы 1000 Н растянется на

1) 1 м
2) 2 см
3) 10 см
4) 20 см

А3. На рисунке представлен график зависимости силы упругости пружины от значения её деформации. Жёсткость этой пружины равна

1) 0,01 Н/м
2) 10 Н/м
3) 20 Н/м
4) 100 Н/м



§ 35 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СИЛЫ УПРУГОСТИ. ЗАКОН ГУКА»

При решении задач по этой теме надо иметь в виду, что закон Гука справедлив только при упругих деформациях тел. Сила упругости не зависит от того, какая происходит деформация: сжатия или растяжения, она одинакова при одинаковых Δl. Кроме этого, считается, что сила упругости вдоль всей пружины одинакова, так как масса пружины обычно не учитывается.

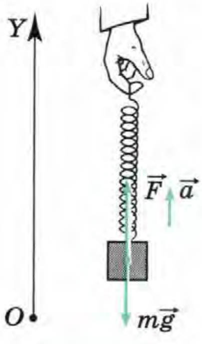


Рис. 3.16

Задача 1. При помощи пружинного динамометра поднимают с ускорением $a = 2{,}5$ м/с^2, направленным вверх, груз массой $m = 2$ кг. Определите модуль удлинения пружины динамометра, если её жёсткость $k = 1000$ Н/м.

Р е ш е н и е. Согласно закону Гука, выражающему связь между модулем внешней силы $\vec{F}$, вызывающей растяжение пружины, и её удлинением, имеем $F = k\Delta l$. Отсюда $\Delta l = \dfrac{F}{k}$.

Для нахождения силы $\vec{F}$ воспользуемся вторым законом Ньютона. На груз, кроме силы тяжести $m\vec{g}$, действует сила упругости пружины, равная по модулю F и направленная вертикально вверх. Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g}$.

Направим ось OY вертикально вверх так, чтобы пружина была расположена вдоль этой оси (рис. 3.16). В проекции на ось OY второй закон Ньютона можно записать в виде $ma_y = F_y + mg_y$.

Так как $a_y = a$, $g_y = -g$ и $F_y = F$, то $F = ma + mg = m(a + g)$.

Следовательно,

$$\Delta l = \frac{m(a+g)}{k} \approx 2{,}5 \text{ см.}$$

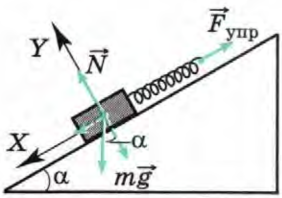


Рис. 3.17

Задача 2. Определите, как изменяется сила натяжения пружины, прикреплённой к бруску массой $m = 5$ кг, находящемуся неподвижно на наклонной поверхности, при изменении угла наклона от 30° до 60°. Трение не учитывайте.

Р е ш е н и е. На брусок действуют сила тяжести, сила натяжения пружины и сила реакции опоры (рис. 3.17).

Условие равновесия бруска: $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}} = 0$.

Запишем это условие в проекциях на оси OX и OY: $\begin{cases} mg\sin\alpha - F_{\text{упр}} = 0; \\ N - mg\cos\alpha = 0. \end{cases}$

Из первого уравнения системы получим $F_{\text{упр}} = mg\sin\alpha$.

При изменении угла наклона изменение силы упругости найдём из выражения $\Delta F_{\text{упр}} = mg(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) = 5 \cdot 10 \cdot (0{,}866 - 0{,}5)$ (Н) $= 18{,}3$ Н.

Задача 3. К потолку подвешены последовательно две невесомые пружины жёсткостями 60 Н/м и 40 Н/м. К нижнему концу второй пружины прикреплён груз массой 0,1 кг. Определите жёсткость воображаемой пружины, удлинение которой было бы таким же, как и двух пружин при подвешивании к ней такого же груза (эффективную жёсткость).

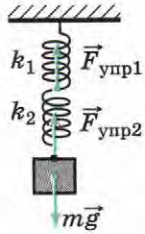


Рис. 3.18

Решение. Так как весом пружин можно пренебречь, то очевидно, что силы натяжения пружин равны (рис. 3.18). Тогда согласно закону Гука

$$F_{упр1} = F_{упр2};\ k_1x_1 = k_2x_2. \qquad (1)$$

На подвешенный груз действуют две силы — сила тяжести и сила натяжения второй пружины.

Условие равновесия груза запишем в виде $mg = k_2x_2$.

Из этого уравнения найдём удлинение $x_2 = \frac{mg}{k_2} = 0{,}025\,(м) = 2{,}5$ см.

Подставив выражение для x_2 в уравнение (1), получим для удлинения $x_1 = \frac{mg}{k_1} = 0{,}017\,(м) = 1{,}7$ см.

Определим теперь эффективную жёсткость. Запишем закон Гука для воображаемой пружины:

$$k_{эфф}x = mg, \text{ или } x = x_1 + x_2 = \frac{mg}{k_{эфф}}. \qquad (2)$$

Подставив в формулу (2) выражения для удлинений x_1 и x_2 пружин, получим $\frac{mg}{k_1} + \frac{mg}{k_2} = \frac{mg}{k_{эфф}}$.

Для эффективной жёсткости получим выражение $k_{эфф} = \frac{k_1k_2}{k_1 + k_2} = 24$ Н/м.

Задача 4. Через блок, закреплённый у края стола, перекинута нерастяжимая нить, к концам которой привязаны брусок массой $m_1 = 1$ кг, находящийся на горизонтальной поверхности стола, и пружина жёсткостью $k = 50$ Н/м, расположенная вертикально. Ко второму концу пружины привязана гиря массой $m_2 = 200$ г (рис. 3.19). Определите удлинение пружины при движении тел. Силу трения, массы пружины, блока и нити не учитывайте.

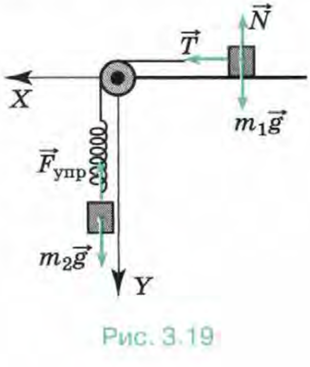


Рис. 3.19

Решение. На брусок действуют сила тяжести, сила реакции опоры и сила натяжения нити.

На гирю действуют сила тяжести и сила натяжения пружины.

Согласно второму закону Ньютона для бруска и гири запишем:

$$m_1\vec{a_1} = m_1\vec{g} + \vec{T} + \vec{N};$$
$$m_2\vec{a_2} = m\vec{g} + \vec{F}_{упр}.$$

В проекциях на выбранные оси координат запишем:
на ось OX: $m_1a_1 = T$;

на ось OY: $\begin{cases} 0 = m_1g - N; \\ m_2a_2 = m_2g - F_{упр}. \end{cases}$ (1)

Так как нить нерастяжима, то модули ускорений равны: $a_1 = a_2 = a$.
В силу условия малых масс пружины, нити и блока можно записать: $T_2 = F_{упр}$ и $T_1 = T_2 = T$.
Учтя последние равенства, систему уравнений (1) запишем в виде

$$\begin{cases} m_1a = T; \\ m_2a = m_2g - T. \end{cases}$$

Выразив ускорение из первого уравнения системы и подставив его во второе, получим $m_2\frac{T}{m_1} = m_2g - T$. Из этого уравнения найдём силу натяжения нити: $T = \dfrac{m_2g}{1 + \dfrac{m_2}{m_1}} = \dfrac{m_1m_2g}{m_1 + m_2}$.

Так как согласно закону Гука $F_{упр} = kx$, то $kx = \dfrac{m_1m_2g}{m_1 + m_2}$.

Тогда удлинение пружины $x = \dfrac{m_1m_2g}{(m_1+m_2)k} = 0{,}033$ м ≈ 33 мм.

Задачи для самостоятельного решения

1. К динамометру привязан груз массой 2 кг. Динамометр с грузом опускают с ускорением 3 м/с^2. Жёсткость пружины 10^3 Н/м. Определите модуль растяжения пружины динамометра.

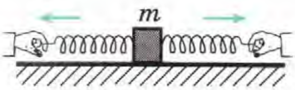


Рис. 3.20

2. К бруску массой 1 кг, находящемуся на гладкой горизонтальной поверхности, прикреплены две пружины (рис. 3.20). Жёсткость правой пружины $2 \cdot 10^3$ Н/м, левой — в 2 раза меньше. Чему равно отношение удлинений пружин в случае, когда брусок неподвижен?

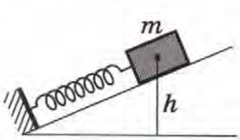


Рис. 3.21

3. Ящик массой 100 кг удерживается на наклонной плоскости на высоте 0,5 м закреплённой у основания пружиной, жёсткость которой равна 10^4 Н/м (рис. 3.21). Определите длину пружины в недеформированном сотоянии. Угол у основания наклонной плоскости равен 30°. Трением можно пренебречь.

4. К нижнему концу лёгкой пружины подвешены связанные невесомой нитью грузы: верхний массой $m_1 = 0{,}5$ кг и нижний массой $m_2 = 0{,}2$ кг. Нить, соединяющую грузы, пережигают. Определите проекцию ускорения на направленную вниз ось OY, с которым начнёт двигаться верхний груз.

СИЛЫ ТРЕНИЯ

§ 36 СИЛЫ ТРЕНИЯ

Вспомните, что такое трение.
Какими факторами оно обусловлено?
Почему изменяется скорость движения по столу бруска после толчка?

Понаблюдайте за движением различных тел. В каких случаях движение происходит за счёт действия сил трения, а в каких случаях они препятствуют движению?

Ещё один вид сил, с которыми имеют дело в механике, — это силы трения. Эти силы действуют вдоль поверхностей тел при их непосредственном соприкосновении.

Силы трения во всех случаях препятствуют относительному движению соприкасающихся тел. При некоторых условиях силы трения делают это движение невозможным. Однако они не только тормозят движение тел. В ряде практически важных случаев движение тела не могло бы возникнуть без действия сил трения.

Запомни Трение, возникающее при относительном перемещении соприкасающихся поверхностей твёрдых тел, называется **сухим трением**.

Обсудите с товарищем, что обеспечивает движение автомобиля: сила трения или работа двигателя, вращающего колёса? Что препятствует увеличению скорости автомобиля?

Различают три вида сухого трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

Трение покоя. Попробуйте сдвинуть пальцем лежащую на столе толстую книгу. Вы приложили к ней некоторую силу, направленную вдоль поверхности стола, а книга остаётся в покое. Следовательно, между книгой и поверхностью стола возникает сила, направленная против той силы, с которой вы действуете на книгу, и в точности равная ей по модулю. Это сила трения $\vec{F}_{тр}$. Вы с большей силой толкаете книгу, но она по-прежнему остаётся на месте. Значит, и сила трения $\vec{F}_{тр}$ настолько же возрастает.

Запомни Силу трения, действующую между двумя телами, неподвижными относительно друг друга, называют **силой трения покоя**.

Если на тело действует сила $\vec{F}$, параллельная поверхности, на которой оно находится, и тело при этом остаётся неподвижным, то это означает, что на него действует сила трения покоя $\vec{F}_{тр}$, равная по модулю и направленная в противоположную сторону силе $\vec{F}$ (рис. 3.22). Следовательно, сила трения покоя определяется действующей на него силой:

$$\vec{F}_{тр} = -\vec{F}.$$

Если действующая на покоящееся тело сила хотя бы немного превысит максимальную силу трения покоя, то тело начнёт скользить.

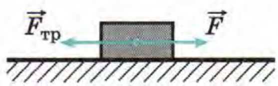


Рис. 3.22

Запомни Наибольшее значение силы трения, при котором скольжение ещё не наступает, называется **максимальной силой трения покоя**.

Для определения максимальной силы трения покоя существует весьма простой, но не очень точный количественный закон. Пусть на столе находится брусок с прикреплённым к нему динамометром. Проведём первый опыт. Потянем за кольцо динамометра и определим максимальную силу трения покоя. На брусок действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}_1$, сила натяжения $\vec{F}_1$ пружины динамометра и максимальная сила трения покоя $\vec{F}_{тр1}$ (рис. 3.23).

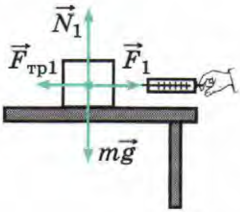


Рис. 3.23

Положим на брусок ещё один такой же брусок. Сила давления брусков на стол увеличится в 2 раза. Согласно третьему закону Ньютона сила нормальной реакции опоры $\vec{N}_2$ также увеличится в 2 раза. Если мы снова измерим максимальную силу трения покоя, то увидим, что она увеличилась во столько раз, во сколько раз увеличилась сила $\vec{N}_2$, т. е. в 2 раза.

Продолжая увеличивать число брусков и измеряя каждый раз максимальную силу трения покоя, мы убедимся в том, что

Важно максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы нормальной реакции опоры.

Если обозначить модуль максимальной силы трения покоя через $F_{тр.\ max}$, то можно записать:

$$F_{тр.\ max} = \mu N, \tag{3.11}$$

где μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения. Коэффициент трения характеризует обе трущиеся поверхности и зависит не только от материала этих поверхностей, но и от качества их обработки. Коэффициент трения определяется экспериментально.

Эту зависимость впервые установил французский физик Ш. Кулон.

Если положить брусок на меньшую грань, то $F_{тр.\ max}$ не изменится.

Важно Максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения тел.

Сила трения покоя изменяется в пределах от нуля до максимального значения, равного μN. За счёт чего может происходить изменение силы трения?

Дело здесь вот в чём. При действии на тело некоторой силы $\vec{F}$ оно слегка (незаметно для глаза) смещается, и это смещение продолжается до тех пор, пока микроскопические шероховатости поверхностей не расположатся относительно друг друга так, что, зацепляясь одна за другую, они приведут к появлению силы, уравно-

Положите брусок, с которым мы уже проводили первый опыт, на грань с меньшей площадью поверхности и также проследите за показаниями динамометра. Сравните результаты, полученные в первом и втором опытах.

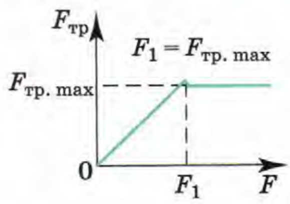


Рис. 3.24

вешивающей силу $\vec{F}$. При увеличении силы $\vec{F}$ тело опять чуть-чуть сдвинется так, что мельчайшие неровности поверхностей по-иному будут цепляться друг за друга, и сила трения возрастёт. И лишь при $F > F_{тр.\ max}$ ни при каком взаимном расположении шероховатостей поверхности сила трения не в состоянии уравновесить силу $\vec{F}$, и начнётся скольжение.

Зависимость модуля силы трения скольжения от модуля действующей силы показана на рисунке 3.24.

При ходьбе и беге на подошвы ног действует сила трения покоя, если только ноги не скользят. Такая же сила действует на ведущие колёса автомобиля. На ведомые колёса также действует сила трения покоя, но уже тормозящая движение, причём эта сила значительно меньше силы, действующей на ведущие колёса (иначе автомобиль не смог бы тронуться с места).

Интересно
В давнее время сомневались, что паровоз сможет ехать по гладким рельсам. Думали, что трение, тормозящее ведомые колёса, будет равно силе трения, действующей на ведущие колёса. Предлагали даже делать ведущие колёса зубчатыми и прокладывать для них специальные зубчатые рельсы.

Трение скольжения. При скольжении сила трения зависит не только от состояния трущихся поверхностей, но и от относительной скорости движения тел, причём эта зависимость от скорости является довольно сложной. Опыт показывает, что часто (хотя и не всегда) в самом начале скольжения, когда относительная скорость ещё мала, сила трения становится несколько меньше максимальной силы трения покоя. Лишь затем, по мере увеличения скорости, она растёт и начинает превосходить $F_{тр.\ max}$.

Вы, вероятно, замечали, что тяжёлый предмет, например ящик, трудно сдвинуть с места, а потом двигать его становится легче. Это как раз и объясняется уменьшением силы трения при появлении скольжения с малой скоростью (см. рис. 3.24).

При не слишком больших относительных скоростях движения сила трения скольжения мало отличается от максимальной силы трения покоя. Поэтому приближённо можно считать её постоянной и равной максимальной силе трения покоя:

$$\boxed{F_{тр} \approx F_{тр.\ max} = \mu N.}$$

Важно Важная особенность силы трения скольжения состоит в том, что она всегда направлена противоположно относительной скорости соприкасающихся тел.

Силу трения скольжения можно уменьшить во много раз с помощью смазки — чаще всего тонкого слоя жидкости (обычно того или иного сорта минерального масла) — между трущимися поверхностями.

Положите на линейку ластик. Начинайте поднимать линейку за один конец. Измерьте угол, при котором ластик начнёт скользить по линейке. Докажите, что тангенс этого угла равен коэффициенту трения: $\mathrm{tg}\alpha = \mu$.

Интересно Ни одна современная машина, например двигатель автомобиля или трактора, не может работать без смазки. Специальная система смазки предусматривается при конструировании всех машин.

Возьмите небольшое колесо, прикрепите к его оси вращения динамометр. Покатите колесо и измерьте силу трения качения. Зажмите колесо так, чтобы оно не могло вращаться. Измерьте силу трения скольжения. Сравните полученные результаты.

Трение между слоями жидкости, прилегающими к твёрдым поверхностям, значительно меньше, чем между сухими поверхностями.

Сила трения качения. Сила трения качения существенно меньше силы трения скольжения, поэтому гораздо легче перекатывать тяжёлый предмет, чем двигать его.

Сила трения зависит от относительной скорости движения тел. В этом её главное отличие от сил тяготения и упругости, зависящих только от расстояний.

Силы сопротивления при движении твёрдых тел в жидкостях и газах. При движении твёрдого тела в жидкости или газе на него действует сила сопротивления среды. Эта сила направлена против скорости тела относительно среды и тормозит движение.

Важно Главная особенность силы сопротивления состоит в том, что она появляется только при наличии относительного движения тела и окружающей среды. Сила трения покоя в жидкостях и газах полностью отсутствует.

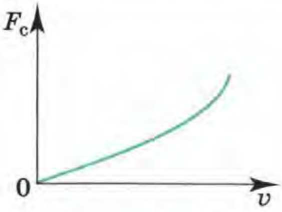


Рис. 3.25

Это приводит к тому, что усилием рук можно сдвинуть тяжёлое тело, например плавающую лодку, в то время как сдвинуть с места, скажем, поезд усилием рук просто невозможно.

Модуль силы сопротивления F_c зависит от размеров, формы и состояния поверхности тела, свойств среды (жидкости или газа), в которой тело движется, и, наконец, от относительной скорости движения тела и среды.

Примерный характер зависимости модуля силы сопротивления от модуля относительной скорости тела показан на рисунке 3.25. При относительной скорости, равной нулю, сила сопротивления не действует на тело ($F_c = 0$). С увеличением относительной скорости сила сопротивления сначала растёт медленно, а затем всё быстрее и быстрее. При малых скоростях движения силу сопротивления можно считать прямо пропорциональной скорости движения тела относительно среды:

$$F_c = k_1 v, \qquad (3.12)$$

где k_1 — коэффициент сопротивления, зависящий от формы, размеров, состояния поверхности тела и свойств среды — её вязкости. Вычислить коэффициент k_1 теоретически для тел сколько-нибудь сложной формы не представляется возможным, его определяют опытным путём.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 v^2, \qquad (3.13)$$

где k_2 — коэффициент сопротивления, отличный от k_1.

Какую из формул — (3.12) или (3.13) — можно использовать в конкретном случае, определяется опытным путём. Например, для легкового автомобиля первую формулу желательно применять приблизительно при 60—80 км/ч, при бóльших скоростях следует использовать вторую формулу.

Силы трения покоя, скольжения, качения. Сила сопротивления Найти

1. Посмотрите вокруг себя. Видите ли вы полезное действие сил трения?
2. Зачем на губках тисков и плоскогубцев делают насечки?
3. Для чего на автомобильных шинах делают рельефный рисунок (протектор)?
4. При каких условиях появляются силы трения?
5. От чего зависят модуль и направление силы трения покоя?
6. В каких пределах может изменяться сила трения покоя?
7. Какая сила сообщает ускорение автомобилю или тепловозу?
8. Может ли сила трения скольжения увеличить скорость тела?
9. В чём состоит главное отличие силы сопротивления в жидкостях и газах от силы трения между двумя твёрдыми телами?
10. Приведите примеры полезного и вредного действия сил трения всех видов.

A1. На горизонтальном полу стоит ящик массой 20 кг. Коэффициент трения между полом и ящиком равен 0,3. К ящику в горизонтальном направлении прикладывают силу 36 Н. Чему равна сила трения между ящиком и полом?
1) 0 2) 24 Н 3) 36 Н 4) 60 Н

A2. Площадь первой боковой грани бруска, находящегося на столе, в 2 раза меньше площади второй грани, а коэффициент трения о поверхность стола в 2 раза больше. При переворачивании бруска с первой грани на вторую сила трения скольжения бруска о стол
1) не изменится
2) уменьшится в 2 раза
3) уменьшится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза

A3. Как изменяется сила трения при соскальзывании стержня с поверхности наклонённого стола? Скорость направлена вдоль стержня.
1) не изменяется
2) изменяется по линейному закону
3) постепенно уменьшается
4) до середины стержня остаётся постоянной, а затем становится равной нулю

A4. Тело равномерно движется по плоскости. Сила давления тела на плоскость равна 8 Н, сила трения равна 2 Н. Коэффициент скольжения равен
1) 0,16 2) 0,25 3) 0,75 4) 4

A5. Конькобежец массой 70 кг скользит по льду. Чему равна сила трения, действующая на конькобежца, если коэффициент трения скольжения коньков по льду равен 0,02?
1) 0,35 Н 2) 1,4 Н 3) 3,5 Н 4) 14 Н

§ 37 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СИЛЫ ТРЕНИЯ»

При решении задач о движении тел, на которые действует сила трения, надо всегда иметь в виду, что сила трения скольжения, действующая на тело, направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения. Поэтому, чтобы нарисовать вектор силы трения, прежде всего надо определить направление движения тела.

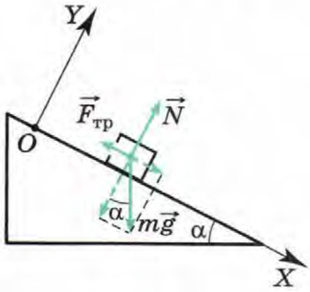


Рис. 3.26

Задача 1. В результате полученного толчка кирпич начал скользить вниз по неподвижной ленте конвейера, расположенной под углом $\alpha = 30°$ к горизонтальной плоскости. Определите модуль и направление ускорения кирпича, если коэффициент трения скольжения кирпича о ленту конвейера $\mu = 0,6$.

Решение. Направим ось OX вдоль наклонной ленты конвейера вниз, а ось OY перпендикулярно ленте конвейера вверх (рис. 3.26). Так как кирпич движется вдоль оси OX, то его ускорение может быть направлено только вдоль этой оси вниз либо вверх. По второму закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}. \quad (1)$$

Запишем уравнение (1) в проекциях на оси OX и OY:

$$ma_x = mg\sin\alpha - F_{тр}, \quad (2)$$
$$0 = N - mg\cos\alpha.$$

Модуль силы трения скольжения выразим через коэффициент трения μ и модуль силы нормальной реакции опоры N:

$$F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в уравнение (2), получим $ma_x = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha$. Окончательно $a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$.

Из формулы следует, что проекция ускорения кирпича на ось OX может быть положительной, отрицательной и равной нулю: если $\sin\alpha > \mu\cos\alpha$, то $a_x > 0$ (вектор ускорения направлен вдоль ленты конвейера вниз); если $\sin\alpha = \mu\cos\alpha$, то $a_x = 0$ (кирпич движется без ускорения); наконец, если $\sin\alpha < \mu\cos\alpha$, то $a_x < 0$ (вектор ускорения направлен вдоль ленты конвейера вверх).

Для случая, рассматриваемого в задаче, $a_x = -0,2$ м/с^2. Следовательно, ускорение кирпича направлено вдоль ленты конвейера вверх и модуль этого ускорения $a = 0,2$ м/с^2.

Задача 2. В кузове автомобиля лежит ящик массой 30 кг. Определите, с каким максимальным ускорением может двигаться автомобиль, начинающий движение, чтобы ящик не сдвинулся. Коэффициент трения ящика о пол кузова равен $\mu = 0,3$.

Решение. Автомобиль движется с ускорением. Чтобы ящик оставался неподвижным, необходимо, чтобы ускорение ящика было равно ускорению автомобиля.

В начале движения автомобиля ящик должен двигаться в сторону, противоположную движению автомобиля, так как по инерции стремится сохранить состояние покоя. Автомобиль движется вправо (рис. 3.27). Тогда скорость ящика относительно автомобиля должна быть направлена влево, следовательно, сила трения должна быть направлена вправо.

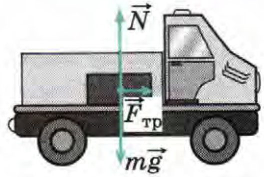


Рис. 3.27

На ящик действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$ покоя. Согласно второму закону Ньютона запишем:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}. \qquad (1)$$

В проекциях на горизонтальное и вертикальное направления запишем:

$$ma = F_{тр}; \qquad (2)$$

$$0 = N - mg. \qquad (3)$$

Так как по условию задачи мы должны найти максимальное ускорение, то в пределе сила трения покоя должна быть равна силе трения скольжения: $F_{тр} = \mu N$.

Подставим это выражение в уравнение (2) и получим $ma = \mu N$.

Из уравнения (3) следует, что $N = mg$. Тогда $ma = \mu mg$ и $a = \mu g \approx 3$ м/с^2.

Задача 3. По наклонной плоскости тянут равноускоренно за канат ящик массой 50 кг. Угол у основания наклонной плоскости 30°, коэффициент трения 0,2. Ящик поднимают на высоту 20 м за 5 с. Определите силу натяжения каната.

Решение. На ящик действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$, сила натяжения каната $\vec{T}$ и сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ (рис. 3.28).

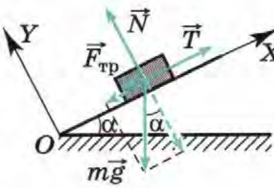


Рис. 3.28

Согласно второму закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} + \vec{T}. \qquad (1)$$

В проекциях на оси OX и OY уравнение имеет вид

$$ma = T - mg\sin\alpha - F_{тр}; \qquad (2)$$

$$0 = N - mg\cos\alpha. \qquad (3)$$

Сила трения скольжения $F_{тр} = \mu N$.

Из уравнения (3) получим $N = mg\cos\alpha$.

Уравнение (2) перепишем в виде $ma = T - mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha$.

Ускорение определим из уравнения движения $s = \dfrac{at^2}{2}$, при этом $s = \dfrac{h}{\sin\alpha}$,

$$a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2h}{t^2\sin\alpha}, \qquad T = m\left(\frac{2h}{t^2\sin\alpha} + g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)\right) \approx 243\ \text{Н}.$$

Задача 4. Девочка тянет равномерно по снегу нагруженные санки массой 40 кг. Коэффициент трения санок о снег 0,04. Определите, под каким углом должна быть расположена верёвка, чтобы её натяжение было минимально.

Решение. На санки действуют сила натяжения верёвки $\vec{F}_н$, сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{тр}$ (рис. 3.29).

Согласно второму закону Ньютона для санок запишем:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_н. \quad (1)$$

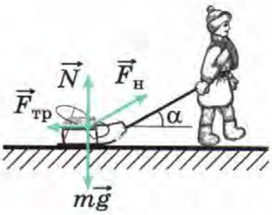


Рис. 3.29

Так как движение по условию равномерное, то ускорение $a = 0$.

Запишем уравнение (1) в проекциях на горизонтальное и вертикальное направления:

$$0 = F_н \cos\alpha - F_{тр}; \quad (2)$$

$$0 = F_н \sin\alpha + N - mg. \quad (3)$$

Сила трения $F_{тр} = \mu N$.

Из уравнения (3) получим $N = mg - F_н \sin\alpha$.

Подставив в уравнение (2) выражение для силы трения

$$F_{тр} = \mu(mg - F_н \sin\alpha), \text{ получим } F_н \cos\alpha - \mu(mg - F_н \sin\alpha) = 0.$$

Для силы натяжения имеем $F_н = \dfrac{\mu mg}{\cos\alpha + \mu\sin\alpha}$.

Сила натяжения минимальна при максимальном значении суммы $\cos\alpha + \mu\sin\alpha = f(\alpha)$.

Исследуем функцию на экстремум: $f' = -\sin\alpha + \mu\cos\alpha = 0$.

Получим $\operatorname{tg}\alpha = \mu$. Тогда $F_н = \dfrac{\mu mg}{\cos\alpha(1 + \mu\operatorname{tg}\alpha)}$. Выразим $\cos\alpha$ через $\operatorname{tg}\alpha$:

$\cos\alpha = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\alpha}} = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}}$. Окончательно для силы натяжения получим

$$F_н = \frac{\mu mg\sqrt{1 + \mu^2}}{1 + \mu^2} = \frac{\mu mg}{\sqrt{1 + \mu^2}} \approx 15{,}7 \text{ Н}.$$

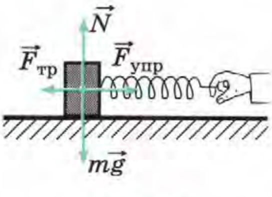


Рис. 3.30

Задача 5. Брусок массой 5 кг тянут по поверхности стола, взявшись за кольцо динамометра. При этом ускорение тела равно 0,5 м/с^2. Жёсткость пружины равна 200 Н/м Определите растяжение пружины. Коэффициент трения бруска о стол 0,05.

Решение. На брусок действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$, сила натяжения пружины $\vec{F}_{упр}$ и сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$ (рис. 3.30).

Согласно второму закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{упр}.$$

В проекции на горизонталь уравнение запишем в виде $ma = F_{упр} - F_{тр}$.

Сила трения $F_{тр} = \mu N = \mu mg$.

Сила упругости $F_{упр} = -kx$.

Тогда $ma = kx - \mu mg$.

Удлинение пружины $x = \dfrac{m(a + \mu g)}{k} = 0{,}025$ м.

Задача 6. Два бруска массами $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 3$ кг соединены нерастяжимой нитью, перекинутой через блок. Брусок с большей массой находится на наклонной плоскости, угол у основания которой равен 30°, коэффициент трения равен 0,04. Определите ускорение брусков.

Р е ш е н и е. На первый брусок действуют сила натяжения нити $\vec{T}_1$ и сила тяжести $m_1\vec{g}$ (рис. 3.31). На второй брусок действуют сила натяжения нити $\vec{T}_2$, сила тяжести $m_2\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$.

Согласно второму закону Ньютона запишем:

$$m_1\vec{a}_1 = m_1\vec{g} + \vec{T}_1, \quad (1)$$

$$m_2\vec{a}_2 = m_2\vec{g} + \vec{T}_2 + \vec{F}_{тр} + \vec{N}. \quad (2)$$

Рассматриваем движение тел относительно одного тела отсчёта, например относительно наклонной плоскости. Модули ускорений брусков равны вследствие условия нерастяжимости нити: $a_1 = a_2 = a$.

Для записи уравнений в проекциях на оси надо знать направления сил. Сила трения направлена в сторону, противоположную относительной скорости бруска. Сила трения может быть направлена и вверх, и вниз вдоль наклонной плоскости.

Рассчитаем, в какую сторону происходит движение брусков. Движение бруска *2* влево обеспечивает проекция силы тяжести на ось X, равная $m_2g\sin\alpha = 15$ Н, а вправо — сила тяжести, действующая на брусок *1*, равная 10 Н. Следовательно, брусок *2* движется вниз и сила трения направлена вверх.

В проекции на ось Y_1 уравнение (1) запишем в виде

$$m_1a = -m_1g + T_1. \quad (3)$$

В проекциях на оси X и Y уравнение (2) запишем в виде

$$m_2a = m_2g\sin\alpha - F_{тр} - T_2, \quad (4)$$

$$0 = N - m_2g\cos\alpha. \quad (5)$$

Сила трения $F_{тр} = \mu N = \mu m_2g\cos\alpha$.

Силы натяжения, действующие на бруски, равны в силу невесомости блока и нити: $T_1 = T_2 = T$.

Уравнения (3) и (4) перепишем в виде

$$\begin{cases} m_1a = -m_1g + T; \\ m_2a = m_2g\sin\alpha - \mu m_2g\cos\alpha - T. \end{cases}$$

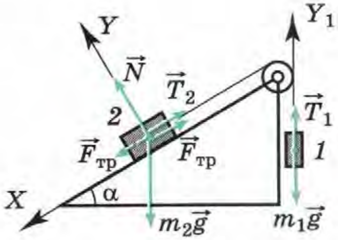


Рис. 3.31

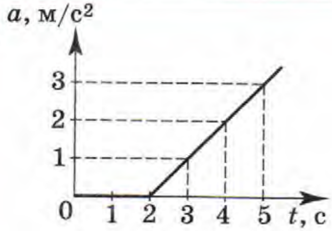
Сложив левые и правые части этих уравнений, получим $(m_1 + m_2)a = -m_1g + m_2g\sin\alpha - \mu m_2g\cos\alpha$.

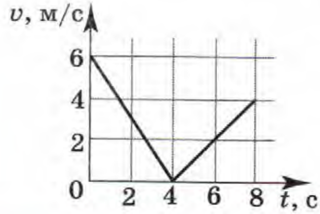
Окончательно для определения ускорения имеем выражение $a = g\dfrac{-m_1 + m_2\sin\alpha - \mu m_2\cos\alpha}{m_1 + m_2} \approx 1$ м/с^2.

Задачи для самостоятельного решения

1. При быстром торможении автомобиль начал двигаться по горизонтальной дороге юзом (заторможенные колёса не вращаются, а скользят по дороге). С каким ускорением при этом движется автомобиль и через сколько времени от начала торможения автомобиль остановится, если его начальная скорость $v_0 = 20$ м/с, а коэффициент трения колёс о дорогу $\mu = 0,8$?

2. Груз массой 97 кг перемещают равномерно по горизонтальной поверхности с помощью верёвки, образующей угол 30° с горизонтом. Определите силу натяжения верёвки, если коэффициент трения равен 0,2.





С1. К покоящемуся на шероховатой горизонтальной поверхности телу приложена нарастающая с течением времени сила тяги $F = bt$, где b — постоянная величина. На рисунке представлен график зависимости ускорения тела от времени действия силы. Определите коэффициент трения скольжения.

С2. По горизонтальной дороге мальчик тянет сани массой 30 кг за верёвку, направленную под углом 60° к плоскости дороги, с силой 100 Н. Коэффициент трения 0,12. Определите ускорение саней. Чему равен путь, пройденный санями за 5 с, если в начальный момент времени их скорость была равна нулю?

С3. Шайба, брошенная вдоль наклонной плоскости, скользит по ней, двигаясь вверх, а затем движется вниз. График зависимости модуля скорости шайбы от времени приведён на рисунке. Определите угол наклона плоскости к горизонту.

Повторите материал главы 3 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Силы в механике»

1. Оптимальные условия запуска космических кораблей, изучающих планеты Солнечной системы.
2. Опасность столкновения планет и их спутников с астероидами, кометами.
3. От рессоры до современных амортизаторов.
4. Зависимость силы сопротивления от формы тела. Спортивные модели автомобилей.
5. Трение полезное и трение вредное.

«Исследование зависимости упругости пружин от их длины и толщины проволоки, из которой они изготовлены»

«Определение коэффициентов трения покоя и скольжения для различных поверхностей»

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Роль законов сохранения в механике, да и в других разделах физики огромна.

Во-первых, они позволяют решать ряд практически важных задач, например, по первоначальному состоянию системы, не зная подробностей взаимодействия тел, определять её конечное состояние, зная скорости тел до взаимодействия, определять скорости этих тел после взаимодействия. *Во-вторых*, и это главное, открытые в механике законы сохранения играют в природе огромную роль, далеко выходящую за рамки самой механики. Они применимы как к телам обычных размеров, так и к космическим телам и элементарным частицам.

ГЛАВА 4 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

§ 38 ИМПУЛЬС МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Вспомните, что такое импульс материальной точки.
С направлением какой из перечисленных величин совпадает направление импульса — силы, скорости или ускорения?

Второй закон Ньютона $m\vec{a} = \vec{F}$ можно записать в иной форме, которая приведена самим Ньютоном в его главном труде «Математические начала натуральной философии».

Если на материальную точку действует постоянная сила, то постоянным будет и ускорение тела $\vec{a} = \dfrac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$, где $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ — начальное и конечное значения скорости материальной точки. Подставив это значение ускорения во второй закон Ньютона, получим

$$\frac{m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{\Delta t} = \vec{F},$$

или

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}\Delta t. \qquad (4.1)$$

Интересно

Произведение массы тела на его скорость Ньютон назвал количеством движения.

Запомни

Импульс материальной точки — это физическая величина, равная произведению массы материальной точки на её скорость:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \qquad (4.2)$$

Из формулы (4.2) видно, что *импульс — векторная величина*. Так как $m > 0$, то импульс имеет такое же направление, как и скорость (рис. 4.1).

Обозначим через $\vec{p}_1 = m\vec{v}_1$ импульс материальной точки в начальный момент времени, а через $\vec{p}_2 = m\vec{v}_2$ — её импульс в конечный момент времени. Тогда разность $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$ есть изменение импульса материальной точки за время Δt. Уравнение (4.1) можно записать так:

$$\boxed{\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.} \qquad (4.3)$$

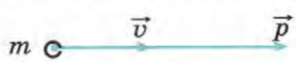


Рис. 4.1

Так как $\Delta t > 0$, то направления векторов $\Delta\vec{p}$ и $\vec{F}$ совпадают. Уравнение (4.3) показывает, что одинаковые изменения импульса могут быть получены в результате действия большой силы в течение малого интервала времени или малой силы за большой промежуток времени.

Запомни Произведение силы на время её действия называют **импульсом силы.**

Уравнение (4.3) есть запись второго закона Ньютона в импульсной форме.

Второй закон Ньютона в импульсной форме Изменение импульса материальной точи равно импульсу действующей на неё силы.

Как определить импульс переменной силы?

Поставьте на лист бумаги банку с водой. Дёрните лист с большой силой так, чтобы он выскользнул из-под банки, а банка при этом осталась бы на месте. Затем потяните лист так, чтобы банка двигалась вместе с листом. Сравните время действия сил. Объясните, почему в первом случае банке не сообщается импульс, а во втором сообщается.

Единица импульса не имеет особого названия, а её наименование получается из определения этой величины (см. формулу (4.2)):

$$1 \text{ ед. импульса} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Для нахождения импульса тела, которое нельзя считать материальной точкой, поступают так: мысленно разбивают тело на отдельные малые элементы (материальные точки), находят импульсы полученных элементов, а потом суммируют их как векторы.

Важно Импульс тела равен сумме импульсов его отдельных элементов.

Импульс системы тел равен векторной сумме импульсов каждого из тел системы: $\vec{p} = \vec{p_1} + \vec{p_2} + \ldots$. Систему тел составляют взаимодействующие тела, движение которых мы рассматриваем.

Закон сохранения импульса. Пусть система состоит из двух тел. Это могут быть две звезды, два бильярдных шара или два других тела.

Запомни Силы, возникающие в результате взаимодействия тела, принадлежащего системе, с телом, не принадлежащим ей, называются **внешними силами**.

Если рассматривать систему, состоящую из двух бильярдных шаров, то сила взаимодействия шаров с краем стола при ударе о него, сила трения шара о поверхность стола — внешние силы. Пусть на тела некоторой системы действуют внешние силы $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$ (рис. 4.2).

Обсудите с одноклассником, в каком случае импульс системы движущихся тел может быть равен нулю.

Запомни Силы, возникающие в результате взаимодействия тел, принадлежащих системе, называются **внутренними силами**.

Обозначим внутренние силы через $\vec{F}_{1,2}$ и $\vec{F}_{2,1}$ (см. рис. 4.2).

Вследствие действия сил на тела системы их импульсы изменяются. Если взаимодействие рассматривается за малый промежуток времени Δt, то для тел системы можно записать второй закон Ньютона в виде

> Рассмотрите с одноклассником взаимодействие двух любых тел. Укажите силы, действующие на тела, и уточните, какие из них являются внешними, а какие — внутренними.

$$\Delta\vec{p_1} = (\vec{F_1} + \vec{F}_{1,2})\Delta t,\ \Delta\vec{p_2} = (\vec{F_2} + \vec{F}_{2,1})\Delta t.$$

Сложив эти равенства, получим

$$\Delta\vec{p_1} + \Delta\vec{p_2} = (\vec{F_1} + \vec{F_2})\Delta t + (\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1})\Delta t. \quad (4.4)$$

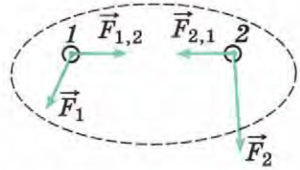


Рис. 4.2

В левой части равенства (4.4) стоит сумма изменений импульсов всех тел системы, т. е. изменение импульса самой системы (под импульсом системы мы будем понимать геометрическую сумму импульсов всех тел системы):

$$\Delta\vec{p}_{\text{сист}} = \Delta\vec{p_1} + \Delta\vec{p_2}. \quad (4.5)$$

По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$. Отсюда следует, что сумма внутренних сил всегда равна нулю:

$$\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1} = 0. \quad (4.6)$$

Учитывая равенства (4.4) и (4.6), можно записать:

$$\Delta\vec{p}_{\text{сист}} = (\vec{F_1} + \vec{F_2})\Delta t,\ \Delta\vec{p}_{\text{сист}} = \vec{F}\Delta t, \quad (4.7)$$

где $\vec{F}$ — геометрическая сумма всех внешних сил, действующих на тела системы.

Мы доказали весьма важное положение:

Важно импульс системы тел могут изменить только внешние силы, причём изменение импульса системы $\Delta p_{\text{сист}}$ совпадает по направлению с суммарной внешней силой.

Внутренние силы изменяют импульсы отдельных тел системы, но изменить суммарный импульс системы они не могут.

Уравнение (4.7) справедливо для любого интервала времени Δt, если сумма внешних сил остаётся постоянной.

Из уравнения (4.7) вытекает *закон сохранения импульса.*

Закон сохранения импульса

Если внешние силы на систему не действуют или их сумма равна нулю, то импульс системы сохраняется:

$$\Delta\vec{p}_{\text{сист}} = 0, \text{ или } \vec{p}_{\text{сист}} = \text{const}. \quad (4.8)$$

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел:

$$m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} + m_3\vec{v_3} + \ldots = m_1\vec{u_1} + m_2\vec{u_2} + m_3\vec{u_3} + \ldots, \quad (4.9)$$

где $\vec{v_1}, \vec{v_2}, \vec{v_3}, \ldots$ — скорости тел до взаимодействия; $\vec{u_1}, \vec{u_2}, \vec{u_3}, \ldots$ — скорости тел после взаимодействия.

Импульс, очевидно, сохраняется в изолированной системе тел, так как в этой системе на тела вообще не действуют внешние силы. Но область применения закона сохранения импульса шире.

1) Если даже на тела системы действуют внешние силы, но их сумма равна нулю, то импульс системы всё равно сохраняется.

2) Если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма проекций сил на какое-то направление равна нулю, то проекция суммарного импульса системы на это направление не меняется.

3) Если внешние силы много меньше внутренних сил, то можно считать, что импульс системы сохраняется. Например, при разрыве снарядов силы, разрывающие снаряд, много больше внешней силы тяжести.

Реактивное движение. Большое значение закон сохранения импульса имеет для исследования реактивного движения.

Запомни **Реактивным движением** называют движение тела, возникающее при отделении некоторой его части с определённой скоростью относительно него.

Примером реактивного движения является движение ракеты при истечении из неё струи горючего газа, образующегося при сгорании топлива.

Запомни Так как вследствие истечения струи ракета движется с ускорением, то можно считать, что на ракету действует сила, называемая **реактивной силой**.

Понаблюдайте за движением воздушного шарика, из которого истекает воздух, и объясните, почему шарик, как правило, движется по кривой. Как изменяется скорость шарика?

Главная особенность реактивной силы в том, что она возникает в результате взаимодействия частей системы без какого-либо взаимодействия с внешними телами.

Реактивные двигатели. В настоящее время в связи с освоением космического пространства получили широкое распространение реактивные двигатели.

В космическом пространстве использовать какие-либо другие двигатели, кроме реактивных, невозможно, так как там нет опоры (твёрдой, жидкой или газообразной), отталкиваясь от которой космический корабль мог бы получать ускорение.

К. Э. Циолковский
(1857—1935)

Успехи в освоении космического пространства. Основы теории реактивного двигателя и научное доказательство возможности полётов в межпланетном пространстве были впервые высказаны и разработаны русским учёным К. Э. Циолковским в работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами».

Нашей стране принадлежит великая честь запуска 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли, а 12 апреля 1961 г. космического корабля с космонавтом Ю. А. Гагариным на борту.

Этот и другие полёты были совершены на ракетах, сконструированных отечественными учёными и инженерами под руководством С. П. Королёва.

Большой вклад в исследование космического пространства внесли также американские учёные, инженеры и астронавты. Два американских астронавта из экипажа космического корабля «Аполлон-11» — Н. Армстронг и Э. Олдрин — 20 июля 1969 г. впервые совершили посадку на Луну. На космическом теле Солнечной системы человеком были сделаны первые шаги.

С выходом человека в космос не только открылись возможности исследования других планет, но и представились поистине фантастические возможности изучения природных явлений и ресурсов Земли, о которых можно было только мечтать. Теперь снимки с орбиты, охватывающие миллионы квадратных километров, позволяют выбирать для исследования наиболее интересные участки земной поверхности, экономя тем самым силы и средства.

С. П. Королёв
(1906—1966)

Ю. А. Гагарин
(1934—1968)

Интересно

Орбитальные аппараты в настоящее время используются не только для научных исследований космического пространства, но и для биологических, медицинских исследований, получения новых материалов.

Освоение космоса имеет огромное практическое значение. Нас уже не удивляет, что мы можем заглянуть практически в каждый уголок Земли, поговорить с человеком, находящимся на другом континенте, благодаря космической (спутниковой) связи.

В настоящее время можно в режиме онлайн смотреть, что происходит в космосе благодаря телескопам, вращающимся по орбитам вокруг Земли.

Закон сохранения импульса. Реактивная сила — Найти

1. Точка движется равномерно по окружности. Изменяется ли её импульс?
2. Как определяется импульс тела?
3. Автомобиль трогается с места. Куда направлен вектор изменения импульса?
4. Хоккейная шайба скользит прямолинейно и замедленно. Куда направлен вектор изменения импульса?
5. Сформулируйте закон сохранения импульса.
6. В каких случаях можно применять закон сохранения импульса?
7. В лежащий на гладком столе брусок попадает пуля, летящая горизонтально. Почему для нахождения скорости бруска с пулей можно применять закон сохранения импульса, хотя на брусок и пулю действуют внешние силы: сила тяжести, нормальная сила реакции стола?
8. Может ли парусная лодка приводиться в движение с помощью компрессора, установленного на ней, если струя воздуха направлена на паруса? Что произойдёт, если поток воздуха будет направлен мимо парусов?
9. Как возникает реактивная сила?
10. Осьминоги и каракатицы перемещаются со скоростью до 60 км/ч, периодически выбрасывая вбираемую в себя воду. По какому принципу перемещаются эти животные?

§ 39 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА»

Закон сохранения импульса целесообразно применять для решения тех задач, в которых требуется определить скорость, а не силу или ускорение.

Для решения задачи нужно записать этот закон в векторной форме: $m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} + \ldots = m_1\vec{u_1} + m_2\vec{u_2} + \ldots$, где $\vec{v_1}$, $\vec{v_2}$ и т. д. — скорости тел системы до взаимодействия, а $\vec{u_1}$, $\vec{u_2}$ и т. д. — их скорости после взаимодействия.

После этого векторное уравнение записывается в проекциях на оси выбранной системы координат. Выбор направления осей диктуется удобством решения задачи. Если, например, все тела движутся вдоль одной прямой, то координатную ось целесообразно направить вдоль этой прямой.

При решении некоторых задач приходится использовать дополнительно уравнения кинематики.

Задача 1. Два шара, массы которых $m_1 = 0{,}5$ кг и $m_2 = 0{,}2$ кг, движутся по гладкой горизонтальной поверхности навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 1$ м/с и $v_2 = 4$ м/с. Определите их скорость v после центрального абсолютно неупругого столкновения.

Запомни **Абсолютно неупругим столкновением** называется взаимодействие тел, после которого они движутся как единое целое с одной скоростью.

Решение. Ось OX направим вдоль линии, проходящей через центры движущихся шаров по направлению скорости $\vec{v_1}$.

После абсолютно неупругого удара шары движутся с одной и той же скоростью $\vec{v}$. Так как вдоль оси OX внешние силы не действуют (трения нет), то сумма проекций импульсов на эту ось сохраняется (сумма проекций импульсов обоих шаров до удара равна проекции общего импульса системы после удара):

$$m_1v_{1x} + m_2v_{2x} = (m_1 + m_2)v_x.$$

Так как $v_{1x} = v_1$, а $v_{2x} = -v_2$, то

$$v_x = (m_1v_1 - m_2v_2)/(m_1 + m_2) \approx -0{,}4 \text{ м/с}.$$

После удара шары будут двигаться в отрицательном направлении оси OX со скоростью 0,4 м/с.

Задача 2. Два пластилиновых шарика, отношение масс которых $m_2/m_1 = 4$, после соударения слиплись и стали двигаться по гладкой горизонтальной поверхности со скоростью u (рис. 4.3, вид сверху). Определите скорость более лёгкого шарика до соударения, если он двигался в 3 раза быстрее тяжёлого ($v_1 = 3v_2$), а направления движения шариков были взаимно перпендикулярны. Трением можно пренебречь.

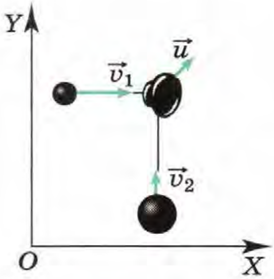


Рис. 4.3

Решение. Так как скорости $\vec{v_1}$ и $\vec{v_2}$ шариков взаимно перпендикулярны, то оси прямоугольной системы координат удобно направить параллельно этим скоростям.

Согласно закону сохранения импульса имеем

$$m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} = (m_1 + m_2)\vec{u}.$$

Запишем это уравнение в проекциях на оси OX и OY, проведённые так, как показано на рисунке 4.3:

$$m_1v_{1x} + m_2v_{2x} = (m_1 + m_2)u_x,$$
$$m_1v_{1y} + m_2v_{2y} = (m_1 + m_2)u_y.$$

Так как $v_{1x} = v_1$, $v_{2x} = 0$, $v_{1y} = 0$, $v_{2y} = v_2$, то

$$u_x = \frac{m_1v_1}{m_1 + m_2} = \frac{3}{5}v_2, \quad u_y = \frac{m_2v_2}{m_1 + m_2} = \frac{4}{5}v_2.$$

Модуль скорости u равен $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = v_2$.

Итак, $v_2 = u$, следовательно, $v_1 = 3u$.

Можно эту задачу решить так. Импульсы $\vec{p_1}$ и $\vec{p_2}$ тел взаимно перпендикулярны, поэтому согласно закону сохранения импульса и теореме Пифагора $(m_1v_1)^2 + (m_2v_2)^2 = (m_1 + m_2)^2u^2$. Тогда $u = \frac{\sqrt{(m_1v_1)^2+(m_2v_2)^2}}{(m_1+m_2)} =$ $= \frac{m_1v_2\sqrt{3^2+4^2}}{5m_1} = v_2$, и, следовательно, $v_1 = 3u$.

Задача 3. Компоненты топлива в двигатель ракеты подаются со скоростью $v_1 = 200$ м/с, а горючий газ выходит из сопла со скоростью $v_2 = 500$ м/с. Массовый расход топлива двигателем $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 30$ кг/с. Определите реактивную силу.

Решение. Изменение импульса топлива массой Δm за время Δt равно

$$\Delta mv_2 - \Delta mv_1 = F\Delta t.$$

Тогда сила, подействовавшая на горючий газ, вырывающийся из сопла ракеты,

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t}(v_2 - v_1).$$

Согласно третьему закону Ньютона сила, подействовавшая на топливо, равна по модулю и противоположна по направлению силе, подействовавшей на ракету, т. е. реактивной силе $\vec{F} = -\vec{F}_р$. Следовательно, искомая сила

$$F_р = \frac{\Delta m}{\Delta t}(v_2 - v_1) = 9000 \text{ Н}.$$

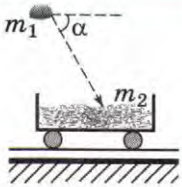
Задачи для самостоятельного решения

1. Неподвижный вагон массой $2 \cdot 10^4$ кг сцепляется с платформой массой $3 \cdot 10^4$ кг. До сцепки платформа имела скорость 1 м/с. Чему равна скорость вагона и платформы после их сцепки?

2. На плот массой 100 кг, имеющий скорость 1 м/с, направленную вдоль берега, прыгает человек массой 50 кг со скоростью 1,5 м/с перпендикулярно берегу. Определите скорость плота с прыгнувшим на него человеком.

3. Будет ли увеличиваться скорость ракеты, если скорость истечения газов относительно ракеты меньше скорости самой ракеты и вытекающие из сопла газы летят вслед за ракетой?

4. Охотник стреляет с лёгкой надувной лодки. Определите скорость лодки после выстрела, если масса охотника 70 кг, масса дроби 35 г и средняя начальная скорость дробинок равна 320 м/с. Ствол ружья во время выстрела образует с горизонтом угол 60°.



C1. Камень массой $m_1 = 4$ кг падает под углом 60° к горизонту со скоростью 10 м/с в тележку с песком, покоящуюся на горизонтальных рельсах (см. рис.). Чему равен импульс тележки с песком и камнем после падения камня?

C2. Снаряд, летящий с некоторой скоростью, разрывается на два осколка. Первый осколок летит под углом 90° к первоначальному направлению со скоростью 50 м/с, а второй — под углом 30° со скоростью 100 м/с. Определите отношение массы первого осколка к массе второго осколка.

C3. Пуля, летящая горизонтально со скоростью, равной 200 м/с, пробивает брусок, находящийся на горизонтальной поверхности, и вылетает из него со скоростью, равной 50 м/с. Масса бруска в 15 раз больше массы пули. Определите коэффициент трения между бруском и поверхностью, если известно, что брусок сместился на расстояние, равное 10 м.

C4. Снаряд выпущен из пушки вертикально вверх со скоростью 400 м/с. В наивысшей точке подъёма он разорвался на два осколка, причём оба осколка упали вблизи точки выстрела. Первый упал со скоростью, в 2 раза большей начальной, а второй — через 80 с после разрыва. Определите отношение масс осколков.

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 4 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Ракетные двигатели и использование реактивного движения для полётов в безвоздушном пространстве»

1. Закон сохранения импульса, реактивная сила. Примеры и демонстрации.
2. Типы ракетных двигателей.
3. Успехи в освоении космического пространства. Полёты на другие планеты.
4. Искуственные спутники Земли.

«Э. К. Циолковский. Идеи Циолковского (по его работам) и их реальное воплощение»

ГЛАВА 5 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Закон сохранения энергии — фундаментальный закон природы, позволяющий описывать большинство происходящих явлений.

Описание движения тел также возможно с помощью таких понятий динамики, как работа и энергия.

§ 40 МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА И МОЩНОСТЬ СИЛЫ

Вспомните, что такое работа и мощность в физике.
Совпадают ли эти понятия с бытовыми представлениями о них?
Совершает ли учитель физики механическую работу во время урока? Если да, то в каких случаях?

Все наши ежедневные действия сводятся к тому, что мы с помощью мышц либо приводим в движение окружающие тела и поддерживаем это движение, либо же останавливаем движущиеся тела.

Этими телами являются орудия труда (молоток, ручка, пила), в играх — мячи, шайбы, шахматные фигуры. На производстве и в сельском хозяйстве люди также приводят в движение орудия труда.

Применение машин во много раз увеличивает производительность труда благодаря использованию в них двигателей.

Понаблюдайте за работой швейной или стиральной машины и найдите в ней устройство, заменяющее ручной труд.

Интересно

Сила тяготения совершает работу при падении капель дождя или камня с обрыва. Одновременно совершает работу и сила сопротивления, действующая на падающие капли или на камень со стороны воздуха. Совершает работу и сила упругости, когда распрямляется согнутое ветром дерево.

Назначение любого двигателя в том, чтобы приводить тела в движение и поддерживать это движение, несмотря на торможение как обычным трением, так и «рабочим» сопротивлением (резец должен не просто скользить по металлу, а, врезаясь в него, снимать стружку; плуг должен взрыхлять землю и т. д.). При этом на движущееся тело должна действовать со стороны двигателя сила.

Работа совершается в природе всегда, когда на какое-либо тело в направлении его движения или против него действует сила (или несколько сил) со стороны другого тела (других тел).

Определение работы. Второй закон Ньютона в импульсной форме $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ позволяет определить, как меняется скорость $\vec{v}$ тела по модулю и направлению, если на него в течение времени Δt действует сила $\vec{F}$.

Запомни Воздействия на тела сил, приводящих к изменению модуля их скорости, характеризуются величиной, зависящей как от сил, так и от перемещений тел. Эту величину в механике и называют **работой силы**.

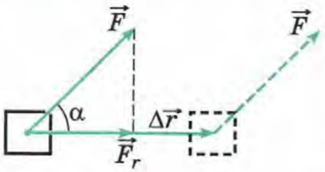


Рис. 5.1

Изменение скорости по модулю возможно лишь в том случае, когда проекция силы F_r на направление перемещения тела отлична от нуля. Именно эта проекция определяет действие силы, изменяющей скорость тела по модулю. Она совершает работу. Поэтому работу можно рассматривать как произведение проекции силы F_r на модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ (рис. 5.1):

$$A = F_r|\Delta\vec{r}|. \tag{5.1}$$

Интересно Наше бытовое представление о работе отличается от определения работы в физике. Вы держите тяжёлый чемодан, и вам кажется, что вы совершаете работу. Однако с точки зрения физики ваша работа равна нулю.

Если угол между силой и перемещением обозначить через α, то $F_r = F\cos\alpha$. Следовательно, работа равна:

$$\boxed{A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha.} \tag{5.2}$$

Важно Работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения точки приложения силы и косинуса угла между ними.

В общем случае при движении твёрдого тела перемещения его разных точек различны, но при определении работы силы мы под $\Delta\vec{r}$ понимаем перемещение её точки приложения. При поступательном движении твёрдого тела перемещение всех его точек совпадает с перемещением точки приложения силы.

Работа, в отличие от силы и перемещения, является не векторной, а скалярной величиной. Она может быть положительной, отрицательной или равной нулю.

Знак работы определяется знаком косинуса угла между силой и перемещением. Если $\alpha < 90°$, то $A > 0$, так как косинус острых углов положителен. При $\alpha > 90°$ работа отрицательна, так как косинус тупых углов отрицателен. При $\alpha = 90°$ (сила перпендикулярна перемещению) работа не совершается.

Если на тело действует несколько сил, то проекция равнодействующей силы на перемещение равна сумме проекций отдельных сил:

$$F_r = F_{1r} + F_{2r} + \dots .$$

Поэтому для работы равнодействующей силы получаем

$$A = F_{1r}|\Delta\vec{r}| + F_{2r}|\Delta\vec{r}| + \dots = A_1 + A_2 + \dots . \tag{5.3}$$

Важно Если на тело действует несколько сил, то полная работа (алгебраическая сумма работ всех сил) равна работе равнодействующей силы.

Совершённую силой работу можно представить графически. Поясним это, изобразив на рисунке зависимость проекции силы от координаты тела при его движении по прямой.

Обсудите с одноклассником случаи движения тел, при которых работа действующих на тела сил равна нулю. Какая сила совершает работу при остановке поезда, а какая не совершает?

Пусть тело движется вдоль оси OX (рис. 5.2), тогда

$$F\cos\alpha = F_x,\ |\Delta\vec{r}| = \Delta x.$$

Для работы силы получаем

$$A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha = F_x\Delta x.$$

Очевидно, что площадь прямоугольника, заштрихованного на рисунке 5.3, *а*, численно равна работе при перемещении тела из точки с координатой x_1 в точку с координатой x_2.

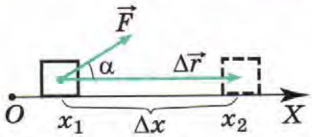


Рис. 5.2

Формула (5.1) справедлива в том случае, когда проекция силы на перемещение постоянна. В случае криволинейной траектории, постоянной или переменной силы мы разделяем траекторию на малые отрезки, которые можно считать прямолинейными, а проекцию силы на малом перемещении $\Delta\vec{r}$ — постоянной. Тогда, вычисляя работу на каждом перемещении $\Delta\vec{r}$, а затем суммируя эти работы, мы определяем работу силы на конечном перемещении (рис. 5.3, *б*).

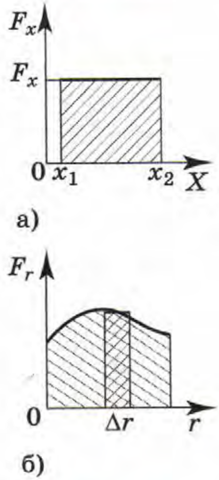


Рис. 5.3

Единица работы. Единицу работы можно установить с помощью основной формулы (5.2). Если при перемещении тела на единицу длины на него действует сила, модуль которой равен единице, и направление силы совпадает с направлением перемещения её точки приложения ($\alpha = 0$), то и работа будет равна единице. В Международной системе (СИ) единицей работы является джоуль (обозначается Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Запомни **Джоуль** — это работа, совершаемая силой 1 Н на перемещении 1 м, если направления силы и перемещения совпадают.

Часто используют кратные единицы работы — килоджоуль и мегаджоуль:

$$1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж},$$
$$1 \text{ МДж} = 1000000 \text{ Дж}.$$

Ударьте резко по бруску, лежащему на столе, и заставьте его двигаться. Какая сила совершает работу при его движении?

Мощность. Работа может быть совершена как за большой промежуток времени, так и за очень малый. На практике, однако, далеко не безразлично, быстро или медленно может быть совершена работа. Временем, в течение которого совершается работа, определяют производительность любого двигателя. Очень большую работу может совершить и крошечный электромоторчик, но для этого понадобится много времени. Потому наряду с работой вводят величину, характеризующую быстроту, с которой она производится, — *мощность*.

Запомни **Мощность** — это отношение работы A к интервалу времени Δt, за который эта работа совершена, т. е. мощность — это скорость совершения работы:

$$N = \frac{A}{\Delta t}. \qquad (5.4)$$

Подставляя в формулу (5.4) вместо работы A её выражение (5.2), получаем

$$N = F\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}\cos\alpha = Fv\cos\alpha. \tag{5.5}$$

Таким образом, если сила и скорость тела постоянны, то мощность равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов. Если же эти величины переменные, то по формуле (5.4) можно определить среднюю мощность подобно определению средней скорости движения тела.

Понятие мощности вводится для оценки работы за единицу времени, совершаемой каким-либо механизмом (насосом, подъёмным краном, мотором машины и т. д.). Поэтому в формулах (5.4) и (5.5) под $\vec{F}$ всегда подразумевается сила тяги.

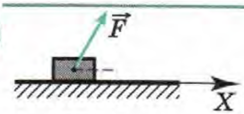
В СИ мощность выражается в ваттах (Вт).

Важно Мощность равна 1 Вт, если работа, равная 1 Дж, совершается за 1 с.

Наряду с ваттом используются более крупные (кратные) единицы мощности: 1 кВт (киловатт) = 1000 Вт, 1 МВт (мегаватт) = 1 000 000 Вт.

Работа силы. Мощность Найти

1. Дайте определение работы в механике.
2. Может ли совершать работу сила трения покоя?
3. Всегда ли сила трения скольжения совершает отрицательную работу?
4. В каких единицах выражается работа?



A1. На горизонтальной поверхности находится тело, на которое действуют с силой 10 Н, направленной под углом 60° к горизонту (см. рис). Под действием этой силы тело перемещается по поверхности на 5 м. Работа силы равна

1) 3000 Дж 2) 50 Дж 3) 25 Дж 4) 0

A2. Мальчик тянет санки за верёвку с силой 50 Н. Пройдя с санками 100 м, он совершил работу 2500 Дж. Чему равен угол между верёвкой и дорогой?

1) 90° 2) 45° 3) 60° 4) 30°

A3. С помощью динамометра, расположенного под углом 30° к горизонтальной поверхности, равномерно перемещают брусок массой 100 г на расстояние, равное 20 см. Работа равнодействующей всех сил равна

1) 0 2) 0,01 Дж 3) 0,02 Дж 4) 0,03 Дж

A4. Под действием силы тяги 1000 Н автомобиль движется с постоянной скоростью 72 км/ч. Мощность двигателя равна

1) 10 кВт 2) 20 кВт 3) 40 кВт 4) 72 кВт

A5. Какую мощность развивает двигатель подъёмного механизма крана, если он равномерно поднимает плиту массой 600 кг на высоту 4 м за 3 с?

1) 72 000 Вт 2) 8000 Вт 3) 7200 Вт 4) 800 Вт

§ 41 ЭНЕРГИЯ. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Вспомните, когда мы можем сказать, что у тела есть энергия.
Какие физические величины определяют механическую энергию тела?
Какие виды механической энергии вы знаете?

Если система тел может совершить работу, то мы говорим, что она обладает энергией.

Важно Энергия характеризует способность тела (или системы тел) совершать работу.

Совершая механическую работу, тело или система тел переходят из одного состояния в другое, в котором их энергия минимальна. Груз опускается, пружина распрямляется, движущееся тело останавливается. При совершении работы энергия постепенно расходуется. Для того чтобы система опять приобрела способность совершать работу, надо изменить её состояние: увеличить скорости тел, поднять тела вверх или деформировать. Для этого внешние силы должны совершить над системой положительную работу.

Энергия в механике — величина, определяемая состоянием системы — положением тел или частей тела и их скоростями.

Запомни **Кинетическая энергия** — это энергия, которой обладает движущееся тело.

Подсчитаем работу постоянной силы $\vec{F}$, действующей на материальную точку массой m при его прямолинейном движении. Пусть направление силы совпадает с направлением скорости материальной точки. В этом случае направления вектора перемещения $\Delta\vec{r}$ и вектора силы совпадают (рис. 5.4). Поэтому работа силы $\vec{F}$:

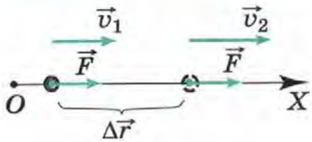


Рис. 5.4

$$A = F|\Delta\vec{r}|.$$

Выберем координатную ось OX так, чтобы векторы $\vec{F}$, $\vec{v}_1$, $\vec{v}_2$ и $\Delta\vec{r}$ были направлены в сторону положительного направления этой оси. Тогда $\Delta r_x = \Delta x$, и формулу для работы можно записать так:

$$A = F\Delta x. \tag{5.6}$$

Согласно второму закону Ньютона

$$F = ma. \tag{5.7}$$

Так как точка движется с постоянным ускорением, то изменение её координаты Δx при переходе из начального положения в конечное можно найти по известной нам из кинематики формуле

$$\Delta x = v_1 t + \frac{at^2}{2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}. \tag{5.8}$$

Повторите кинематику и выведите самостоятельно формулу (5.8).

Подставляя формулы (5.7) и (5.8) в формулу (5.6), получаем

$$A = ma\,\frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \tag{5.9}$$

Интересно Можно показать, что формула (5.9), выведенная для случая прямолинейного движения тела, на которое действует постоянная сила, справедлива и в тех случаях, когда на тело действует переменная сила и оно движется по криволинейной траектории.

Таким образом, работа силы при перемещении точки из начального положения в конечное равна изменению величины $\frac{mv^2}{2}$, называемой *кинетической энергией* (от греческого слова «кинема» — движение).

Запомни **Кинетическая энергия материальной точки** — это величина, равная половине произведения массы материальной точки на квадрат её скорости:

$$E_{к} = \frac{mv^2}{2}. \tag{5.10}$$

Энергия выражается в тех же единицах, что и работа. Учитывая равенство (5.10), уравнение (5.9) можно записать так:

$$A = E_{к2} - E_{к1} = \Delta E_{к}. \tag{5.11}$$

Равенство (5.11) выражает *теорему об изменении кинетической энергии.*

Важно Изменение кинетической энергии материальной точки при её перемещении равно работе, совершённой силой, действующей на точку при этом перемещении.

Почему мы говорим об алгебраической сумме работ? Пусть изменение кинетической энергии тела равно нулю. Могут ли при этом работы сил, действующих на него, быть отличны от нуля?

Если на точку действует несколько сил, то изменение её кинетической энергии равно алгебраической сумме работ всех сил, действующих на неё:

$$\Delta E_{к} = A_1 + A_2 + \dots .$$

Кинетическая энергия тел зависит только от их масс и скоростей.

Важно Изменение кинетической энергии материальной точки зависит от начальной и конечной скоростей точки и не зависит от того, каким образом изменялась её скорость, под действием каких сил происходило это изменение.

Энергия. Кинетическая энергия Найти

1. Как выглядит график изменения кинетической энергии материальной точки в зависимости от модуля её скорости? Начертите его.
2. Какую работу совершила сила, действующая на точку, если направление её скорости изменилось на противоположное, а модуль её остался без изменения?
3. Три тела массами m_1, m_2 и m_3 имеют скорости v_1, v_2 и v_3, направленные под углом друг к другу. Запишите выражение для кинетической энергии системы этих трёх тел.
4. Зависит ли кинетическая энергия материальной точки от выбора системы отсчёта?
5. Может ли кинетическая энергия иметь отрицательное значение?

§ 42 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЁ ИЗМЕНЕНИЕ»

Очень часто для решения задач о движении тела, скорость которого изменяется, удобно пользоваться теоремой об изменении кинетической энергии. Такой способ позволяет решать задачи и в том случае, когда силы, действующие на тело, являются переменными. Очевидно, что решение подобных задач на основании второго закона Ньютона затруднено тем, что движение происходит с переменным ускорением.

Задача 1. Шофёр выключает двигатель и начинает тормозить, когда видит, что впереди меняют асфальт и дорога покрыта песком. Начальная скорость автомобиля 90 км/ч. Шофёр нажал на тормоз на расстоянии 60 м от границы между асфальтом и песком. Определите коэффициент трения колёс автомобиля о дорогу, покрытую песком, если машина до остановки проехала по ней 2,5 м. Коэффициент трения колёс машины об асфальт $\mu_1 = 0,5$.

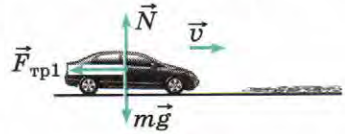


Рис. 5.5

Р е ш е н и е. Согласно теореме об изменении кинетической энергии изменение кинетической энергии автомобиля равно алгебраической сумме работ всех сил, действующих на него.

На автомобиль действуют (рис. 5.5) сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры $\vec{N}$, сила трения, причём на первом участке пути сила трения равна $F_{тр1} = \mu_1 N$, а на втором — $F_{тр2} = \mu_2 N$.

Силы тяжести и нормальной реакции опоры перпендикулярны перемещению, поэтому работы их на данном перемещении равны нулю.

Тогда $0 - mv^2/2 = -F_{тр1}s_1 - F_{тр2}s_2 = -(\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2)N$.

Очевидно, что $N = mg$.

Подставив N в уравнение, получим $mv^2/2 = (\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2)mg$.

Окончательно $\mu_2 = \dfrac{v^2}{2gs_2} - \dfrac{\mu_1 s_1}{s_2} \approx 0,8$.

Задача 2. Маятник, представляющий собой маленький шарик, подвешенный на тонкой нити длиной 1 м, отклонили так, что нить стала составлять с вертикалью угол 60°. Затем шарик отпустили. Определите скорость шарика в тот момент, когда угол отклонения нити равен 30° и когда шарик проходит положение равновесия.

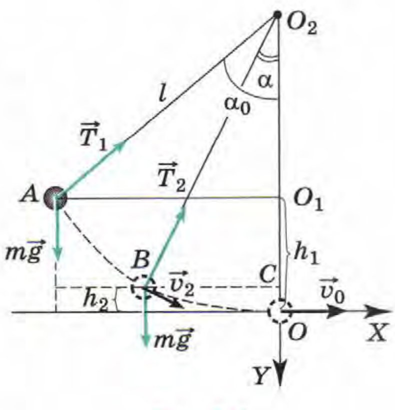


Рис. 5.6

Р е ш е н и е. На шарик во время движения действуют две силы — сила тяжести и сила натяжения (рис. 5.6). Изменение кинетической энергии шарика при перемещении из точки A в точку B равно:

$$mv_2^2/2 - 0 = A_т + A_н. \quad (1)$$

Работа силы натяжения равна нулю, так как она всё время перпендикулярна перемещению. На основании закона о независимости движений движение шарика можно рассматривать как сумму двух движений: по оси OX и по оси OY.

Работа силы тяжести при перемещении шарика вдоль оси OX равна нулю, так как сила тяжести перпендикулярна перемещению вдоль этой оси.

Работа силы тяжести при перемещении вдоль оси OY равна $A_т = mg\Delta y$, где $\Delta y = h_1 - h_2$.

Из треугольника AO_2O_1 получим $O_1O_2 = l\cos\alpha_0$, тогда $h_1 = l - O_1O_2 = l(1 - \cos\alpha_0)$, а из треугольника BO_2C получим $O_2C = l\cos\alpha$, $h_2 = l - O_2C = l(1 - \cos\alpha)$.

Окончательно $h_1 - h_2 = l(\cos\alpha - \cos\alpha_0)$.

Работа силы тяжести равна $A_т = mgl(\cos\alpha - \cos\alpha_0)$.

Подставив найденное выражение для работы в уравнение (1), получим

$$mv_2^2/2 = mgl(\cos\alpha - \cos\alpha_0).$$

Скорость в точке B: $v_2 = \sqrt{2gl(\cos\alpha - \cos\alpha_0)} \approx 2,7$ м/с.

Перемещение шарика вдоль оси OY при движении из точки A в точку O равно h_1. Тогда скорость шарика в точке O: $v_0 = \sqrt{2gl\cos\alpha_0} \approx 3,2$ м/с.

Задача 3. Тело брошено вертикально вверх со скоростью $v_0 = 10$ м/с. Определите наибольшую высоту подъёма h_{max}, а также скорость тела на высоте, равной $h_{max}/2$. Силой сопротивления воздуха можно пренебречь.

Решение. Изменение кинетической энергии тела при подъёме на максимальную высоту равно работе силы тяжести: $0 - mv_0^2/2 = -mgh_{max}$. Из этого уравнения сразу же получаем выражение для максимальной высоты подъёма: $h_{max} = v_0^2/2g = 5$ м.

Скорость тела на некоторой высоте при падении равна его скорости на той же высоте при подъёме.

Определим скорость тела при падении с максимальной высоты. Согласно теореме об изменении кинетической энергии $mv^2/2 - 0 = mgh = mgh_{max}/2$. (Сила тяжести при спуске совершает положительную работу.) Тогда для скорости получаем формулу $v = \sqrt{gh_{max}}$. С учётом выражения для h_{max} окончательно получим $v = \sqrt{gv_0^2/2g} = v_0/\sqrt{2} \approx 7,1$ м/с.

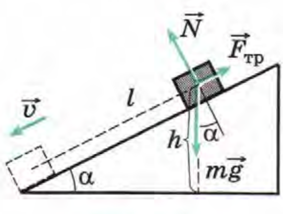


Рис. 5.7

Задача 4. Груз тянут вверх по наклонной плоскости с углом α у основания. На высоте h верёвка обрывается. Определите скорость груза у основания плоскости. Коэффициент трения груза о плоскость равен μ.

Решение. На груз действуют силы тяжести, нормальной реакции опоры и трения (рис. 5.7).

Изменение кинетической энергии при соскальзывании груза равно:

$$mv^2/2 - 0 = A_т + A_{тр}. \quad (1)$$

Работа силы нормальной реакции опоры равна нулю, так как эта сила перпендикулярна перемещению.

Как видно из рисунка, работа силы тяжести равна $A_т = mgl\sin\alpha = mgh$.

Сила трения $F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha$.

Работа силы трения $A_{тр} = -\mu mgl\cos\alpha$. Длина пути $l = \dfrac{h}{\sin\alpha}$.

Тогда $A_{тр} = -\mu mgh\cos\alpha/\sin\alpha = -\mu mgh\,\mathrm{ctg}\,\alpha$.

Подставив найденные выражения для работ сил тяжести и трения в уравнение (1), получим $mv^2/2 = mgh - \mu mgh\,\mathrm{ctg}\,\alpha = mgh(1 - \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)$.

Тогда для скорости получим выражение $v = \sqrt{2gh(1 - \mu\,\mathrm{ctg}\,\alpha)}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Мяч массой 1 кг падает с высоты 2 м. Определите изменение кинетической энергии мяча на первой и второй половинах пути.

2. Человек сначала несёт груз массой 4 кг до шкафа, а затем ставит его на шкаф, подняв груз на высоту 1 м. Определите работу силы тяжести, действующей на груз при его перемещении.

3. Скорость тела массой 2 кг изменяется согласно уравнению $v_x = 5 + 4t + 2t^2$. Определите работу сил, действующих на тело в течение первых четырёх секунд.

C1. Чему равен тормозной путь автомобиля массой 1000 кг, движущегося со скоростью 30 м/с по горизонтальной дороге? Коэффициент трения скольжения между дорогой и шинами автомобиля равен 0,3.

C2. На столе закреплена доска длиной $l = 0{,}9$ м. На доске у её левого торца лежит небольшой брусок. Коэффициент трения скольжения бруска о доску $\mu = 0{,}5$. Какую минимальную скорость v_0 нужно сообщить бруску, чтобы он соскользнул с правого торца доски?

C3. Пуля летит горизонтально со скоростью $v_0 = 150$ м/с, пробивает стоящий на горизонтальной поверхности льда брусок и движется в прежнем направлении со скоростью $1/3\ v_0$. Масса бруска в 10 раз больше массы пули. Коэффициент трения скольжения между бруском и льдом $\mu = 0{,}1$. На какое расстояние s переместится брусок к моменту, когда его скорость уменьшится на 10 %?

C4. Бруски с массами m и $3m$ скользят по горизонтальной поверхности доски навстречу друг другу. Скорость каждого бруска перед абсолютно неупругим ударом равна по модулю $v = 3$ м/с. Коэффициент трения скольжения между брусками и доской $\mu = 0{,}2$. На какое расстояние переместятся слипшиеся бруски к моменту, когда их общая скорость уменьшится на 40 %?

C5. В тело массой 4,8 кг, лежащее на гладком участке горизонтальной поверхности, попадает снаряд массой 0,2 кг, летящий под углом 60° к горизонту со скоростью 40 м/с, и застревает в нём. Попав на шероховатую часть поверхности, тело проходит до остановки путь, равный 12 см. Определите коэффициент трения скольжения между телом и поверхностью.

§ 43 РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И СИЛЫ УПРУГОСТИ. КОНСЕРВАТИВНЫЕ СИЛЫ

По какой формуле можно вычислить работу силы?
Что общего между работой силы тяжести и силы упругости?

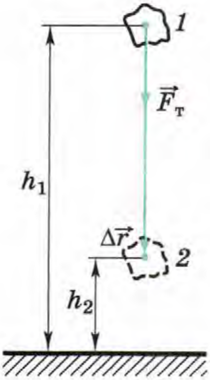


Рис. 5.8

Работа силы тяжести. Вычислим работу силы тяжести при падении тела (например, камня) вертикально вниз. В начальный момент времени тело находилось на высоте h_1 над поверхностью Земли, а в конечный момент времени — на высоте h_2 (рис. 5.8). Модуль перемещения тела $|\Delta\vec{r}| = h_1 - h_2$.

Направления векторов силы тяжести $\vec{F}_т$ и перемещения $\Delta\vec{r}$ совпадают. Согласно определению работы (см. формулу (5.2)) имеем

$$A = |\vec{F}_т|\,|\Delta\vec{r}|\cos 0^\circ = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2. \quad (5.12)$$

Пусть теперь тело бросили вертикально вверх из точки, расположенной на высоте h_1 над поверхностью Земли, и оно достигло высоты h_2 (рис. 5.9). Векторы $\vec{F}_т$ и $\Delta\vec{r}$ направлены в противоположные стороны, а модуль перемещения $|\Delta\vec{r}| = h_2 - h_1$. Работу силы тяжести запишем так:

$$A = |\vec{F}_т|\,|\Delta\vec{r}|\cos 180^\circ = -mg(h_2 - h_1) = mgh_1 - mgh_2. \quad (5.13)$$

> Предположите, что тело перемещается между точками *1* и *2* (см. рис. 5.10) по ломаной линии. Покажите, что работа силы тяжести и в этом случае определяется выражением (5.13).

Если же тело перемещается по прямой так, что направление перемещения составляет угол α с направлением силы тяжести (рис. 5.10), то работа силы тяжести равна:

$$A = |\vec{F}_т|\,|\Delta\vec{r}|\cos\alpha = mg|BC|\cos\alpha.$$

Из прямоугольного треугольника BCD видно, что $|BC|\cos\alpha = BD = h_1 - h_2$. Следовательно,

$$A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2. \quad (5.14)$$

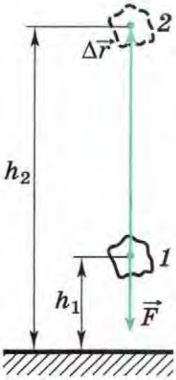


Рис. 5.9

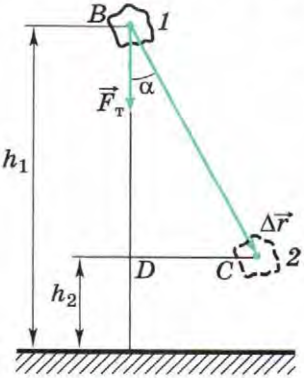


Рис. 5.10

Это выражение совпадает с выражением (5.12).

Формулы (5.12), (5.13), (5.14) дают возможность подметить важную закономерность. При прямолинейном движении тела работа силы тяжести в каждом случае равна разности двух значений величины, зависящей от положений тела, определяемых высотами h_1 и h_2 над поверхностью Земли.

Более того, работа силы тяжести при перемещении тела массой m из одного положения в другое не зависит от формы траектории, по которой движется тело. Действительно, если тело перемещается вдоль кривой BC (рис. 5.11), то, представив эту кривую в виде ступенчатой линии, состоящей из вертикальных и горизонтальных участков малой длины, увидим, что на горизонтальных участках работа силы тяжести равна нулю, так как сила перпендикулярна перемещению, а сумма работ на вертикальных участках равна работе, которую совершила бы сила тяжести при перемещении тела по вертикальному отрезку длиной $h_1 - h_2$. Таким образом, работа силы тяжести при перемещении вдоль кривой BC равна:

$$A = mgh_1 - mgh_2.$$

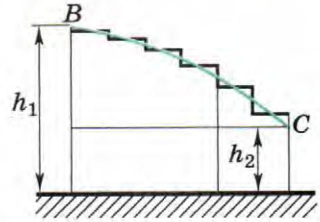


Рис. 5.11

Важно Мы показали, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от положений начальной и конечной точек траектории.

Определим работу A при перемещении тела по замкнутому контуру, например по контуру $BCDEB$ (рис. 5.12). Работа A_1 силы тяжести при перемещении тела из точки B в точку D по траектории BCD: $A_1 = mg(h_2 - h_1)$, по траектории DEB: $A_2 = mg(h_1 - h_2)$. Тогда суммарная работа $A = A_1 + A_2 = mg(h_2 - h_1) + mg(h_1 - h_2) = 0$.

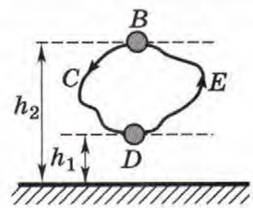


Рис. 5.12

Важно При движении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Итак, работа силы тяжести не зависит от формы траектории тела; она определяется лишь начальным и конечным положениями тела. При перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Запомни Силы, работа которых не зависит от формы траектории точки приложения силы и по замкнутой траектории равна нулю, называют **консервативными силами**.

Работа силы упругости. Вычислим работу, которую совершает сила упругости при перемещении некоторого груза.

На рисунке 5.13, *а* показана пружина, у которой один конец закреплён неподвижно, а к другому концу прикреплён шар. Совместим начало координат с центром шара, тогда координата шара будет равна удлинению пружины. Если пружина растянута, то она действует на шар с силой $\vec{F_1}$ (рис. 5.13, *б*), направленной к положению равновесия шара, в котором пружина не деформирована. Начальное удлинение пружины равно x_1. Вычислим работу силы упругости при перемещении шара из точки с координатой x_1 в

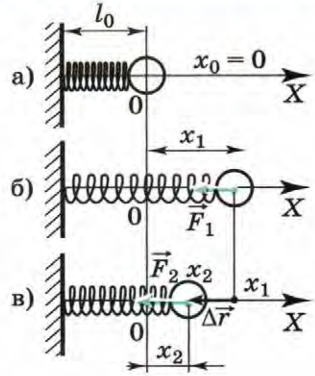


Рис. 5.13

точку с координатой x_2. Из рисунка 5.13, *в* видно, что модуль перемещения равен:

$$|\Delta\vec{r}| = x_1 - x_2. \tag{5.15}$$

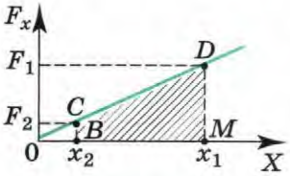


Рис. 5.14

Мы рассматриваем случай, когда направления силы упругости и перемещения тела совпадают.

Для вычисления работы переменной силы упругости воспользуемся графиком зависимости модуля силы упругости от координаты шара (рис. 5.14).

В § 40 мы показали, что работа может быть определена по графику зависимости F_x от x и что эта работа численно равна площади заштрихованной фигуры (см. рис. 5.3, *б*).

В нашем примере работа силы упругости на перемещении $x_1 - x_2$ точки её приложения численно равна площади трапеции $BCDM$. Следовательно,

$$A = \frac{F_1 + F_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{F_1 + F_2}{2}|\Delta\vec{r}|. \tag{5.16}$$

Согласно закону Гука значения сил упругости $F_1 = kx_1$ и $F_2 = kx_2$. Подставляя эти выражения в уравнение (5.16) и учитывая, что $|\Delta\vec{r}| = x_1 - x_2$, получаем

$$A = \frac{kx_1 + kx_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2}.$$

Или окончательно

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} > 0. \tag{5.17}$$

Работа силы упругости при растяжении пружины, т. е. когда направление силы противоположно перемещению тела: $A = -\frac{kx_1^2}{2} + \frac{kx_2^2}{2} < 0$.

Важно Если начальное и конечное состояния пружины совпадают, то суммарная работа силы упругости при деформации пружины равна нулю.

Попробуйте доказать самостоятельно, что сила тяготения также консервативна.

Во всех случаях движения тела под действием силы упругости мы пришли бы к той же формуле (5.17) для работы, т. е. работа силы упругости зависит лишь от удлинения или сжатия пружины в начальном и конечном состояниях.

Таким образом, работа силы упругости не зависит от формы траектории и, так же как и сила тяжести, сила упругости является консервативной.

Работа сил тяжести, упругости. Консервативные силы — Найти

1. Чему равна работа силы тяжести и силы упругости при перемещении тела по замкнутой траектории?
2. Какие силы называют консервативными? Каково их общее свойство?

§ 44 ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Вспомните, какая связь существует между работой силы тяжести и потенциальной энергией.
Почему работа силы упругости определяется её средним значением?

Согласно теореме об изменении кинетической энергии работа силы, действующей на тело, равна изменению его кинетической энергии:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta E_к. \qquad (5.18)$$

Если же силы взаимодействия между телами являются консервативными, то, используя явные выражения для сил, мы показали (см. § 43), что работу таких сил можно также представить в виде разности двух значений некоторой величины, зависящей от взаимного расположения тел (или частей одного тела):

$$A = mgh_1 - mgh_2 \text{ (для силы тяжести)},$$
$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} \text{ (для силы упругости)}. \qquad (5.19)$$

Здесь высоты h_1 и h_2 определяют взаимное расположение тела и поверхности Земли, а удлинения x_1 и x_2 — взаимное расположение частей тела, например витков деформированной пружины.

Из формул (5.18) и (5.19) следует, что

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = mgh_1 - mgh_2 \quad \text{и} \quad \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Запомни Величину, равную произведению массы m тела на ускорение свободного падения g и на высоту h тела над поверхностью Земли, называют **потенциальной энергией тела в поле силы тяжести** и обозначают $E_п$:

$$E_п = mgh. \qquad (5.20)$$

Запомни Величину, равную половине произведения коэффициента упругости k тела на квадрат удлинения или сжатия x, называют **потенциальной энергией упруго деформированного тела**:

$$E_п = \frac{kx^2}{2}. \qquad (5.21)$$

В обоих случаях потенциальная энергия определяется расположением тел системы или частей одного тела относительно друг друга.

Запомни **Потенциальная энергия** — это энергия взаимодействия тел, обусловленная их взаимным расположением или взаимным расположением частей тела.

Введя понятие потенциальной энергии, мы получаем возможность выразить работу любых консервативных сил через изменение потенциальной энергии. Под изменением величины понимают разность между её конечным и начальным значениями, поэтому $\Delta E_п = E_{п2} - E_{п1}$.

Следовательно, оба уравнения (5.19) можно записать так:

$$A = E_{п1} - E_{п2} = -(E_{п2} - E_{п1}) = -\Delta E_п, \qquad (5.22)$$

откуда $\Delta E_п = -A$.

Важно Изменение потенциальной энергии тела равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком.

Например, при падении камня на Землю его потенциальная энергия убывает ($\Delta E_п < 0$), но сила тяжести совершает положительную работу ($A > 0$). Следовательно, A и $\Delta E_п$ имеют противоположные знаки в соответствии с формулой (5.22).

Нулевой уровень потенциальной энергии. Согласно уравнению (5.22) работа консервативных сил определяет не саму потенциальную энергию, а её изменение.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии, то только изменение энергии в механике имеет физический смысл. Поэтому

Важно можно произвольно *выбрать* состояние системы, в котором её потенциальная энергия *считается* равной нулю. Этому состоянию соответствует нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии.

Приведите примеры выбора нулевого уровня отсчёта потенциальной энергии, относительно которого потенциальная энергия тела будет иметь отрицательные значения.

Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии. Важна лишь разность значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях системы тел.

Выбор нулевого уровня производится по-разному и диктуется условиями данной задачи.

Обычно в качестве состояния с нулевой потенциальной энергией выбирают состояние системы с минимальным значением энергии. Тогда потенциальная энергия всегда положительна или равна нулю.

Итак, потенциальная энергия системы «тело — Земля» — величина, зависящая от положения тела относительно Земли, равная работе консервативной силы при перемещении тела из точки, где оно находится, в точку, соответствующую нулевому уровню потенциальной энергии системы.

У пружины потенциальная энергия минимальна в отсутствие деформации, а у системы «камень — Земля» — когда камень лежит на поверхности Земли. Поэтому в первом случае $E_п = \frac{kx^2}{2}$, а во втором случае $E_п = mgh$. Но к данным выражениям можно добавить любую постоянную величину C. При этом изменение потенциальной энергии, определяемое работой консервативной силы, останется прежним.

Обсудите с товарищем, как изменится положение нулевого уровня потенциальной энергии, если считать $C = mgh_0$.

Важно Изолированная система тел стремится к состоянию, в котором её потенциальная энергия минимальна.

Если не удерживать тело, то оно падает на землю ($h = 0$); если отпустить растянутую или сжатую пружину, то она вернётся в недеформированное состояние ($x = 0$).

Потенциальная энергия в механике   Найти

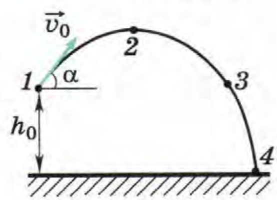
1. В чём состоит сходство кинетической энергии тела с потенциальной?
2. В чём состоит различие между кинетической энергией и потенциальной?
3. Может ли потенциальная энергия быть отрицательной?

А1. Легковой автомобиль и автокран движутся по мосту, причём масса автокрана 4500 кг. Чему равна масса легкового автомобиля, если отношение потенциальной энергии автокрана и легкового автомобиля относительно уровня воды равно 3?

1) 500 кг   2) 1000 кг   3) 1500 кг   4) 3400 кг

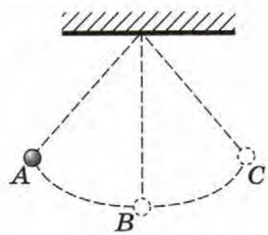
А2. На рисунке представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой из четырёх точек, отмеченных на траектории, потенциальная энергия имеет минимальное значение?

1) *1*   2) *2*   3) *3*   4) *4*



А3. Математический маятник колеблется между точками A и C с периодом T. В начальный момент времени маятник находится в точке A (см. рис.). Через какой промежуток времени его потенциальная энергия в первый раз достигнет минимального значения? Сопротивление воздуха не учитывайте.

1) T 2) $\frac{1}{2}T$ 3) $\frac{1}{4}T$ 4) $\frac{1}{8}T$



А4. При удлинении на 2 см стальная пружина имеет потенциальную энергию упругой деформации 4 Дж. Как изменится потенциальная энергия этой пружины при уменьшении удлинения на 1 см?

1) уменьшится на 1 Дж
2) уменьшится на 2 Дж
3) уменьшится на 3 Дж
4) уменьшится на 4 Дж

А5. При растяжении пружины на 0,1 м в ней возникает сила упругости, равная 2,5 Н. Определите потенциальную энергию этой пружины при растяжении на 0,08 м.

1) 25 Дж   2) 0,16 Дж   3) 0,08 Дж   4) 0,04 Дж

§ 45 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИКЕ

Как изменяются потенциальная, кинетическая и полная механическая энергии тела при его свободном падении вниз? если тело брошено вверх?

Обратимся к простой системе тел, состоящей из земного шара и поднятого над поверхностью Земли тела, например камня.

Камень падает под действием силы тяжести. Силу сопротивления воздуха учитывать не будем. Изменение кинетической энергии камня равно работе сил тяжести:

$$\Delta E_к = A_т. \quad (5.23)$$

Изменение потенциальной энергии равно работе силы тяжести, взятой с обратным знаком:

$$\Delta E_п = -A_т. \quad (5.24)$$

Работа силы тяжести, действующей со стороны камня на земной шар, практически равна нулю. Из-за большой массы земного шара его перемещением и изменением скорости можно пренебречь. Из формул (5.23) и (5.24) следует, что

$$\Delta E_к = -\Delta E_п. \quad (5.25)$$

Равенство (5.25) означает, что увеличение кинетической энергии системы равно убыли её потенциальной энергии (или наоборот). Отсюда следует, что

$$\Delta E_к + \Delta E_п = 0,$$

или

$$\Delta(E_к + E_п) = 0. \quad (5.26)$$

Изменение суммы кинетической и потенциальной энергий системы равно нулю.

Полная *механическая энергия* E равна сумме кинетической и потенциальной энергий тел, входящих в систему:

$$E = E_к + E_п. \quad (5.27)$$

Так как изменение полной энергии системы в рассматриваемом случае согласно уравнению (5.26) равно нулю, то энергия остаётся постоянной:

$$\boxed{E = E_к + E_п = \text{const}.} \quad (5.28)$$

Закон сохранения механической энергии В изолированной системе, в которой действуют консервативные силы, механическая энергия сохраняется.

Закон сохранения механической энергии является частным случаем *общего закона сохранения энергии.*

Общий закон сохранения энергии Энергия не создаётся и не уничтожается, а только превращается из одной формы в другую.

Учитывая, что в рассматриваемом конкретном случае $E_п = mgh$ и $E_к = \frac{mv^2}{2}$, закон сохранения механической энергии можно записать так:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}, \quad (5.29)$$

или

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

Это уравнение позволяет очень просто найти скорость v_2 камня на любой высоте h_2 над землёй, если известна начальная скорость камня на исходной высоте h_1.

Закон сохранения механической энергии (5.28) легко обобщается на случай любого числа тел и любых консервативных сил взаимодействия между ними. Под $E_к$ нужно понимать сумму кинетических энергий всех тел, а под $E_п$ — полную потенциальную энергию системы. Для системы, состоящей из тела массой m и горизонтально расположенной пружины (см. рис. 5.13), закон сохранения механической энергии имеет вид

> Чем мы пренебрегаем, когда говорим, что механическая энергия падающего камня сохраняется? Какие превращения энергии реально происходят при падении камня в воздухе?

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const}. \qquad (5.30)$$

Уменьшение механической энергии системы под действием сил трения. Рассмотрим влияние сил трения на изменение механической энергии системы.

Если в изолированной системе силы трения совершают работу при движении тел относительно друг друга, то её механическая энергия не сохраняется. В этом легко убедиться, толкнув книгу, лежащую на столе. Из-за действия силы трения книга почти сразу останавливается. Сообщённая ей механическая энергия исчезает. Сила трения совершает отрицательную работу и уменьшает кинетическую энергию. Но потенциальная энергия при этом не увеличивается. Поэтому полная механическая энергия убывает. Кинетическая энергия не превращается в потенциальную.

> **Интересно**
> Нагревание при действии сил трения легко обнаружить. Для этого, например, достаточно энергично потереть монету о стол. С повышением температуры, как известно из курса физики основной школы, повышается кинетическая энергия теплового движения молекул или атомов. Следовательно, при действии сил трения кинетическая энергия тела превращается в кинетическую энергию хаотично движущихся молекул.

Силы трения (сопротивления) неконсервативны. Отличие сил трения от консервативных сил становится особенно наглядным, если рассмотреть работу тех и других на замкнутом пути. Работа силы тяжести, например, на замкнутом пути всегда равна нулю. Она положительна при падении тела с высоты h и отрицательна при подъёме на ту же высоту. Работа же силы сопротивления воздуха отрицательна как при подъёме тела вверх, так и при движении его вниз. Поэтому на замкнутом пути она обязательно меньше нуля.

В любой системе, состоящей из больших макроскопических тел, действуют силы трения. Следовательно, даже в изолированной системе движущихся тел механическая энергия обязательно убывает. Постепенно затухают колебания маятника, останавливается машина с выключенным двигателем и т. д.

Но убывание механической энергии не означает, что эта энергия исчезает бесследно. В действительности происходит переход энергии из механической

Запишите закон сохранения механической энергии для системы «шарик — пружина», если шарик колеблется на вертикальной пружине.

Интересно В двигателях внутреннего сгорания, паровых турбинах, электродвигателях и т. д. механическая энергия появляется за счёт убыли энергии других форм: химической, электрической и т. д.

формы в другие. Обычно при работе сил трения происходит нагревание тел, или, как говорят, увеличение их внутренней энергии.

Во всех процессах, происходящих в природе, как и в создаваемых приборах, устройствах, всегда выполняется закон сохранения и превращения энергии: энергия не исчезает и не появляется вновь, она может только перейти из одного вида в другой.

Закон сохранения механической энергии Найти

1. Что называется полной механической энергией системы?
2. Может ли сохраняться механическая энергия системы, на которую действуют внешние силы?
3. Тело падает с высоты H. Постройте графики зависимости потенциальной, кинетической и полной энергий системы «тело—Земля» от высоты h. Все высоты считайте от поверхности Земли.
4. В каких случаях механическая энергия системы сохраняется?
5. Почему сила трения является неконсервативной?
6. Во что переходит механическая энергия в системе, в которой действуют силы трения?

А1. Тело массой 1 кг, брошенное вертикально вверх с поверхности земли, достигло максимальной высоты 20 м. С какой по модулю скоростью двигалось тело на высоте 10 м? Сопротивление воздуха не учитывайте.

1) 7 м/с 2) 10 м/с 3) 14,1 м/с 4) 20 м/с

А2. Скорость брошенного мяча непосредственно перед ударом о стену была вдвое больше его скорости сразу после удара. Какое количество теплоты выделилось при ударе, если перед ударом кинетическая энергия мяча была равна 20 Дж?

1) 5 Дж 2) 15 Дж 3) 20 Дж 4) 30 Дж

А3. С балкона высотой 20 м на поверхность Земли упал мяч массой 0,2 кг. Из-за сопротивления воздуха скорость мяча у поверхности Земли оказалась на 20 % меньше скорости тела, свободно падающего с высоты 20 м. Импульс тела в момент падения равен

1) 4 кг · кг/с 2) 4,2 кг · кг/с 3) 3,2 кг · кг/с 4) 6,4 кг · кг/с

§ 46 РАБОТА СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

В чём выражается гравитационное взаимодействие тел?
Как доказать наличие взаимодействия Земли и, например, учебника физики?

В § 43 мы рассмотрели работу силы тяжести и выяснили, что сила тяжести — консервативная сила. Теперь найдём выражение для работы силы тяготения и докажем, что работа этой силы не зависит от формы траектории, т. е. что сила тяготения также консервативная сила.

Напомним, что работа консервативной силы по замкнутому контуру равна нулю.

Пусть тело массой m находится в поле тяготения Земли. Очевидно, что размеры этого тела малы по сравнению с размерами Земли, поэтому его можно считать материальной точкой. На тело действует сила тяготения

$$F = G\frac{mM}{r^2},$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса Земли, r — расстояние, на котором находится тело от центра Земли.

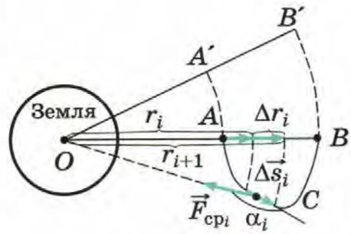


Рис. 5.15

Пусть тело перемещается из положения A в положение B по разным траекториям: 1) по прямой AB; 2) по кривой $AA'B'B$; 3) по кривой ACB (рис. 5.15)

1. Рассмотрим первый случай. Сила тяготения, действующая на тело, непрерывно уменьшается, поэтому рассмотрим работу этой силы на малом перемещении $\Delta r_i = r_{i+1} - r_i$. Среднее значение силы тяготения равно:

$$F_{\text{ср}i} = G\frac{mM}{r^2_{\text{ср}i}}, \text{ где } r^2_{\text{ср}i} = r_i r_{i+1}.$$

Чем меньше Δr_i, тем более справедливо написанное выражение $r^2_{\text{ср}i} = r_i r_{i+1}$.

Проверьте это утверждение, подставляя разные числа.

r_i	r_{i+1}	$r_i\ r_{i+1}$	$r_{\text{ср}i} = r_i + r_{i+1}/2$	$r^2_{\text{ср}i}$

Тогда работу силы $F_{\text{ср}i}$ на малом перемещении Δr_i можно записать в виде

$$\Delta A_i = -F_{\text{ср}i}(r_{i+1} - r_i) = -G\frac{mM}{r^2_{\text{ср}i}}(r_{i+1} - r_i) = -GmM\left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}}\right).$$

Суммарная работа силы тяготения при перемещении тела из точки A в точку B равна:

$$A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \ldots = -GmM\left(\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \ldots - \frac{1}{r_B}\right) =$$

$$= -GmM\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right). \quad (5.31)$$

2. При движении тела по траектории $AA'B'B$ (см. рис. 5.15) очевидно, что работа силы тяготения на участках AA' и $B'B$ равна нулю, так как сила тяготения направлена к точке O и перпендикулярна любому малому перемещению по дуге окружности. Следовательно, работа будет также определяться выражением (5.31).

3. Определим работу силы тяготения при движении тела от точки A к точке B по траектории ACB (см. рис. 5.15). Работа силы тяготения на малом перемещении Δs_i равна $\Delta A_i = F_{\text{ср}i}\Delta s_i \cos\alpha_i$.

Из рисунка видно, что $\Delta s_i \cos\alpha_i = -\Delta r_i$ и суммарная работа опять же будет определяться по формуле (5.31).

Итак, можно сделать вывод, что $A_1 = A_2 = A_3$, т. е. что работа силы тяготения не зависит от формы траектории. Очевидно, что работа силы тяготения при перемещении тела по замкнутой траектории $AA'B'BA$ равна нулю.

Важно Сила тяготения — консервативная сила.

Изменение потенциальной энергии равно работе силы тяготения, взятой с обратным знаком: $\Delta E_{\text{п}} = +GmM\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$.

Если выбрать нулевой уровень потенциальной энергии на бесконечности, т. е. $E_{\text{п}B} = 0$ при $r_B \to \infty$, то $0 - E_{\text{п}A} = \frac{GmM}{r_A}$, следовательно, $E_{\text{п}A} = -\frac{GmM}{r_A}$.

Потенциальная энергия тела массой m, находящегося на расстоянии r от центра Земли, равна:

$$E_{\text{п}} = -\frac{GmM}{r}.$$

Закон сохранения энергии для тела массой m, движущегося в поле тяготения, имеет вид

$$\frac{mv_1^2}{2} - G\frac{mM}{r_1} = \frac{mv_2^2}{2} - G\frac{mM}{r_2},$$

где v_1 — скорость тела на расстоянии r_1 от центра Земли, v_2 — скорость тела на расстоянии r_2 от центра Земли.

Определим, какую минимальную скорость надо сообщить телу вблизи поверхности Земли, чтобы оно в отсутствие сопротивления воздуха могло удалиться от неё за пределы сил земного притяжения.

Запомни Минимальную скорость, при которой тело в отсутствие сопротивления воздуха может удалиться за пределы сил земного притяжения, называют **второй космической скоростью для Земли**.

На тело со стороны Земли действует сила тяготения, которая зависит от расстояния центра масс этого тела до центра масс Земли. Поскольку неконсервативных сил нет, полная механическая энергия тела сохраняется. Внутренняя потенциальная энергия тела остаётся постоянной, так как оно не деформируется. Согласно закону сохранения механической энергии

$$-G\frac{mM_З}{r} + \frac{mv^2}{2} = \text{const}.$$

На поверхности Земли тело обладает и кинетической, и потенциальной энергией:

$$W = \frac{mv_{II}^2}{2} - G\frac{mM_З}{R_З},$$

где v_{II} — вторая космическая скорость, $M_З$ и $R_З$ — соответственно масса и радиус Земли.

В бесконечно удаленной точке, т. е. при $r \to \infty$, потенциальная энергия тела равна нулю ($W_п = 0$), а так как нас интересует минимальная скорость, то и кинетическая энергия также должна быть равна нулю: $W_к = 0$.

Из закона сохранения энергии следует:

$$\frac{mv_{II}^2}{2} - G\frac{mM_З}{R_З} = 0, \quad \frac{mv_{II}^2}{2} = G\frac{mM_З}{R_З},$$

отсюда

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_З}{R_З}}.$$

Эту скорость можно выразить через ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли (при расчётах, как правило, этим выражением пользоваться удобнее). Поскольку $mg = G\frac{mM_З}{R_З^2}$, то $GM_З = gR_З^2$.

Следовательно, искомая скорость

$$v_{II} = \sqrt{2gR_З}, \quad v_{II} = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 6{,}4 \cdot 10^6}\,(\text{м/с}) = 11\ 200\ \text{м/с} = 11{,}2\ \text{км/с}.$$

Точно такую же скорость приобрело бы тело, упавшее на Землю с бесконечно большой высоты, если бы не было сопротивления воздуха. Заметим, что вторая космическая скорость в $\sqrt{2}$ раза больше, чем первая.

Определите значение второй космической скорости для Марса. Все необходимые данные найдите в Интернете.

Работа силы тяготения. Вторая космическая скорость Найти

1. Является ли сила тяготения консервативной? Почему?
2. Какие физические величины остаются постоянными, а какие изменяются при расчёте второй космической скорости?
3. Изменится ли значение второй космической скорости, если ракету запустить из глубокой шахты?
4. Как изменится выражение для потенциальной энергии тела в поле тяготения, если за нулевой уровень её отсчёта взять поверхность Земли?

§ 47 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ»

При применении закона сохранения механической энергии для решения задач надо, прежде всего, выяснить, какое состояние системы целесообразно считать начальным, а какое — конечным, затем записать выражение для начальной энергии системы и приравнять его выражению для конечной. При записи потенциальной энергии надо предварительно выбрать нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии системы.

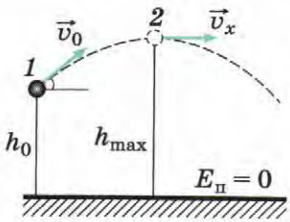


Рис. 5.16

Задача 1. Мяч брошен с высоты 1 м под углом 60° к горизонту со скоростью 4 м/с. Определите максимальную высоту подъёма мяча над поверхностью Земли. Силу сопротивления при движении мяча не учитывайте.

Решение. Выберем нулевой уровень потенциальной энергии на поверхности Земли (рис. 5.16). В момент броска в начальном положении *1* мяч обладает кинетической и потенциальной энергиями:

$$E_1 = E_{к1} + E_{п1} = \frac{mv_0^2}{2} + mgh_0.$$

В момент максимальной высоты h_{max} подъёма скорость мяча направлена горизонтально. Горизонтальная составляющая скорости при движении мяча остаётся постоянной и равной $v_x = v_0 \cos\alpha$.

Механическая энергия в положении *2*: $E_2 = E_{к2} + E_{п2} = (mv_0^2\cos^2\alpha)/2 + mgh_{max}$.

Так как по условию задачи силой сопротивления можно пренебречь, то считаем, что на мяч действует только консервативная сила — сила тяжести, и, следовательно, полная механическая энергия мяча сохраняется:

$$\frac{mv_0^2}{2} + mgh_0 = \frac{mv_0^2\cos^2\alpha}{2} + mgh_{max}.$$

Тогда максимальная высота h_{max}: $h_{max} = h_0 + \dfrac{v_0^2}{2g}\sin^2\alpha = 1{,}6$ м.

Задача 2. Недеформированную пружину растягивают на $\Delta l = 10$ см. Определите работу деформирующей пружину силы и силы упругости пружины, если для растяжения пружины на $\Delta l_0 = 1$ см требуется сила $F_0 = 2$ Н.

Решение. Абсолютные удлинения пружины выразим в единицах СИ: $\Delta l_0 = 0{,}01$ м, $\Delta l = 0{,}1$ м. Найдём жёсткость пружины. Из закона Гука $F_0 = k\Delta l_0$ следует: $k = F_0/\Delta l_0$. Работа деформирующей силы: $A = \dfrac{k(\Delta l)^2}{2} =$ $= \dfrac{F_0}{\Delta l_0}\dfrac{(\Delta l)^2}{2} = 1$ Дж. Направление силы упругости противоположно направлению деформирующей силы, а по модулю эти силы равны, поэтому $A_{упр} = -1$ Дж.

Задача 3. На нити длиной l висит груз. На какую высоту необходимо поднять груз, отклоняя нить от вертикали, чтобы при движении груза вниз без начальной скорости в момент прохождения положения равновесия сила натяжения нити превышала в 2 раза силу тяжести, действующую на груз?

Решение. При прохождении нити через вертикальное положение на груз действуют сила натяжения нити $\vec{T}$ и сила тяжести $m\vec{g}$, лежащие на одной прямой (рис. 5.17). Поэтому ускорение $\vec{a}$ груза является центростремительным и направлено вертикально вверх.

По второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{T} + m\vec{g}$.

Запишем этот закон в проекции на ось OY (см. рис. 5.17): $T - mg = ma$, где $a = v^2/l$. Учитывая, что $T = 2mg$, получаем $mg = ma$, $v^2 = gl$.

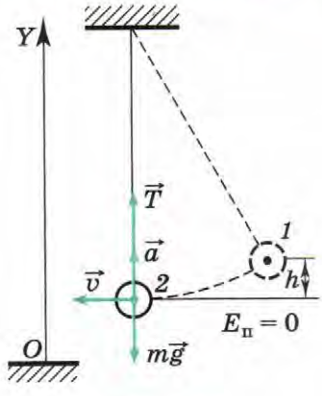


Рис. 5.17

Для определения h применим закон сохранения механической энергии, считая, что в положении *2* потенциальная энергия системы «тело—Земля» равна нулю. Тогда в положении *1* система имеет потенциальную энергию $E_п = mgh$, где h — высота тела относительно нулевого уровня. В положении *2* тело обладает лишь кинетической энергией $E_к = mv^2/2$.

По закону сохранения механической энергии $mv^2/2 = mgh$, $v^2 = 2gh$. Учитывая, что $v^2 = gl$, получаем $2gh = gl$, откуда $h = l/2$.

Задача 4. Определите скорости двух шаров массами m_1 и m_2 после центрального абсолютно упругого удара. Скорости шаров до удара v_1 и v_2 соответственно.

Решение. Закон сохранения импульса системы имеет вид

$$m_1\vec{v_1} + m_2\vec{v_2} = m_1\vec{u_1} + m_2\vec{u_2}, \qquad (1)$$

где $\vec{u_1}$ и $\vec{u_2}$ — скорости шаров после удара.

Запишем уравнение (1) в проекции на ось X (рис. 5.18) (предположим, что шары после удара разлетаются в разные стороны):

$$m_1v_1 - m_2v_2 = -m_1u_1 + m_2u_2. \qquad (2)$$

Запишем закон сохранения энергии:

$$m_1v_1^2/2 + m_2v_2^2/2 = m_1u_1^2/2 + m_2u_2^2/2. \qquad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют систему двух уравнений относительно двух неизвестных u_1 и u_2. Перенесём все члены системы, содержащие m_1, в левую часть уравнения, а содержащие m_2, в правую: $m_1(v_1 + u_1) = m_2(v_2 + u_2)$, $m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - v_2^2)$.

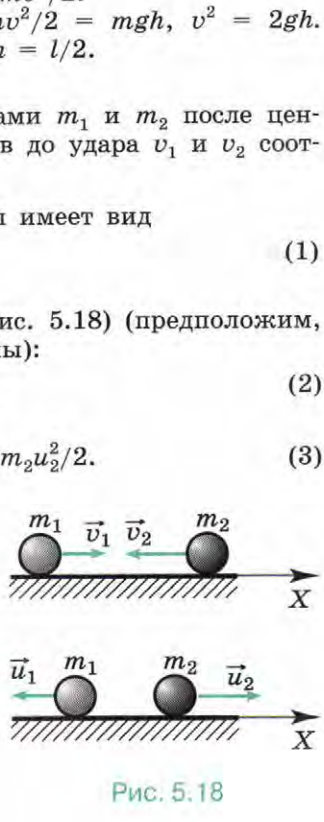


Рис. 5.18

Очевидно, что $u_1 \neq -v_1$ и $u_2 \neq -v_2$, так как скорости шаров после соударения должны измениться. Разделив левые и правые части равенств одно на другое, получим $v_1 - u_1 = v_2 - u_2$, откуда $u_2 = v_1 + v_2 - u_1$.

Подставив u_2 в уравнение (2), получим уравнение относительно u_1:

$$m_1v_1 - m_2v_2 = -m_1u_1 + m_2v_1 + m_2v_2 - m_2u_1.$$

Окончательно $u_1 = \dfrac{2m_2v_2 + v_1(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2}$; $u_2 = \dfrac{2m_1v_1 + v_2(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите суммарную работу сил, которая будет совершена, если сила, равная 3 Н, поднимет груз массой 100 г на высоту 5 м.

2. Груз массой 97 кг перемещают с помощью верёвки с постоянной скоростью по горизонтальной поверхности. Угол между верёвкой и этой поверхностью равен 30°. Коэффициент трения равен 0,2. Определите работу силы натяжения верёвки на пути 100 м.

3. С какой скоростью двигался вагон массой 20 000 кг по горизонтальному пути, если при ударе о преграду каждая пружина буфера сжалась на 10 см? Известно, что для сжатия пружины буфера на 1 см требуется сила 10 000 Н. Вагон имеет два буфера.

4. Автомобиль, имеющий массу 1 т, трогается с места и, двигаясь равноускоренно, проходит путь 20 м за время 2 с. Какую мощность при этом развивает двигатель автомобиля?

С1. Груз массой 100 г привязан к нити длиной 1 м. Нить с грузом отвели от вертикали на угол 90° и отпустили. Чему равно центростремительное ускорение груза в момент, когда нить образует с вертикалью угол 60°?

С2. Брусок массой m_1 = 600 г, движущийся со скоростью 2 м/с, сталкивается с неподвижным бруском массой m_2 = 200 г. Какой будет скорость первого бруска после столкновения? Удар считайте центральным и абсолютно упругим.

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 5 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Закон сохранения энергии»

1. Виды энергии в природе. Взаимные превращения энергии.
2. Устройства для совершения механической работы (принципиальные схемы, макеты).

«Создание модели лодки, движущейся за счёт реактивной силы»

ГЛАВА 6 ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА

§ 48 ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Повторите основные понятия и соотношения кинематики вращательного движения абсолютно твёрдого тела, изложенные в § 16 главы 1.

Угловое ускорение. Ранее мы получили формулу, связывающую линейную скорость v, угловую скорость ω и радиус R окружности, по которой движется выбранный элемент (материальная точка) абсолютно твёрдого тела, которое, вращается относительно неподвижной оси:

$$\boxed{v = \omega R.}$$

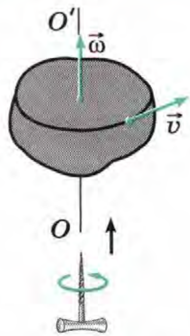


Рис. 6.1

Мы знаем, что *линейные* скорости и ускорения точек твёрдого тела различны. В то же время *угловая скорость* всех точек твёрдого тела одинакова.

Угловая скорость — векторная величина. Направление угловой скорости определяется по правилу буравчика. Если направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вращения тела, то поступательное движение буравчика указывает направление вектора угловой скорости (рис. 6.1).

Однако равномерное вращательное движение встречается довольно редко. Гораздо чаще мы имеем дело с движением, при котором угловая скорость изменяется, очевидно, это происходит в начале и конце движения.

Причиной изменения угловой скорости вращения является действие на тело сил.

Изменение угловой скорости со временем определяет *угловое ускорение*.

Интересно

Вектор угловой скорости — это скользящий вектор. Независимо от точки приложения его направление указывает направление вращения тела, а модуль определяет быстроту вращения.

Важно

Среднее угловое ускорение равно отношению изменения угловой скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло: $\varepsilon = \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}$.

При равноускоренном движении угловое ускорение постоянно и при неподвижной оси вращения характеризует изменение угловой скорости по модулю. При увеличении угловой скорости вращения тела угловое ускорение направлено в ту же сторону, что и угловая скорость (рис. 6.2, *а*), а при уменьшении — в противоположную (рис. 6.2, *б*).

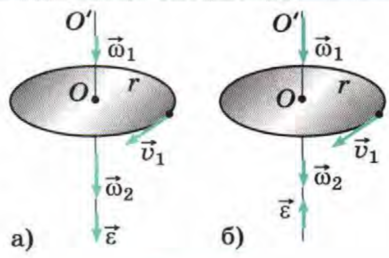


Рис. 6.2

Так как угловая скорость связана с линейной скоростью соотношением $v = \omega R$, то

Чем различаются два вектора — вектор линейной скорости и вектор угловой скорости.

Интересно Неравномерно движутся при запуске и остановке любые вращающиеся тела, например ротор в электродвигателе, диск токарного станка, колесо автомобиля при разгоне и др.

Обсудите с товарищем, может ли угловая скорость вращения не изменяться, если на тело действуют силы.

изменение линейной скорости за некоторый промежуток времени Δt равно $\Delta v = \Delta\omega R$. Разделив левую и правую части уравнения на Δt, имеем $\frac{\Delta v}{\Delta t} = R\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$, или $a = \varepsilon R$, где a — *касательное* (линейное) *ускорение*, направленное по касательной к траектории движения (окружности).

Если время измерено в секундах, а угловая скорость — в радианах в секунду, то одна единица углового ускорения равна 1 рад/с^2, т. е. угловое ускорение выражается в радианах на секунду в квадрате.

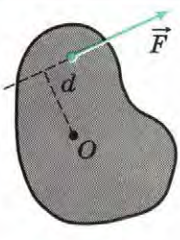


Рис. 6.3

Момент силы. Для создания вращательного движения важно не только значение силы, но также и точка её приложения. Отворить дверь, оказывая давление около петель, очень трудно, в то же время вы легко её откроете, надавливая на дверь как можно дальше от оси вращения, например на ручку. Следовательно, для вращательного движения существенно не только значение силы, но и расстояние от оси вращения до точки приложения силы. Кроме этого, важно и направление приложенной силы. Можно тянуть колесо с очень большой силой, но так и не вызвать его вращения.

Запомни **Момент силы** — это физическая величина, равная произведению силы на плечо:

$$M = Fd,$$

где d — плечо силы, равное кратчайшему расстоянию от оси вращения до линии действия силы (рис. 6.3).

Очевидно, что момент силы максимален, если сила перпендикулярна радиус-вектору, проведённому от оси вращения до точки приложения этой силы.

Важно Если на тело действует несколько сил, то суммарный момент равен алгебраической сумме моментов каждой из сил относительно данной оси вращения.

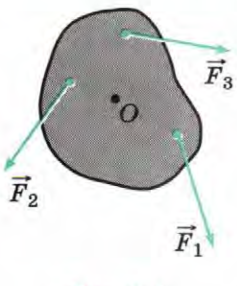


Рис. 6.4

При этом моменты сил, вызывающих вращение тела против часовой стрелки, будем считать *положительными* (сила $\vec{F_2}$), а моменты сил, вызывающих вращение по часовой стрелке, — *отрицательными* (силы $\vec{F_1}$ и $\vec{F_3}$) (рис. 6.4).

Основное уравнение динамики вращательного движения. Подобно тому как опытным путём было показано, что ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе, было установлено, что угловое ускорение прямо пропорционально моменту силы:

$$\varepsilon \sim M.$$

Пусть на материальную точку, движущуюся по окружности, действует сила $\vec{F}$ (рис. 6.5). Согласно второму закону Ньютона в проекции на касательное направление имеем $ma_к = F_к$. Умножив левую и правую части уравнения на r, получим $ma_к r = F_к r$, или

$$mr^2\varepsilon = M. \qquad (6.1)$$

Заметим, что в данном случае r — кратчайшее расстояние от оси вращения до материальной точки и соответственно точки приложения силы.

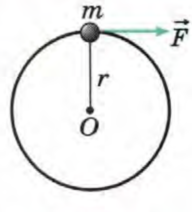


Рис. 6.5

Запомни Произведение массы материальной точки на квадрат расстояния до оси вращения называют **моментом инерции материальной точки** и обозначают буквой I.

Таким образом, уравнение (6.1) можно записать в виде $I\varepsilon = M$, откуда

$$\boxed{\varepsilon = \frac{M}{I}.} \qquad (6.2)$$

Запомни Уравнение (6.2) называют **основным уравнением динамики вращательного движения**.

Уравнение (6.2) справедливо и для вращательного движения *твёрдого тела*, имеющего неподвижную ось вращения, где I — момент инерции твёрдого тела, а M — суммарный момент сил, действующих на тело. В этой главе при расчёте суммарного момента сил мы рассматриваем только силы или их проекции, принадлежащие плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Понаблюдайте, как человек прикладывает силу к колесу, чтобы раскрутить его.

Важно Угловое ускорение, с которым вращается тело, прямо пропорционально сумме моментов сил, действующих на него, и обратно пропорционально моменту инерции тела относительно данной оси вращения.

Если система состоит из набора материальных точек (рис. 6.6), то момент инерции этой системы относительно данной оси вращения OO' равен сумме моментов инерции каждой материальной точки относительно этой оси вращения: $I = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + \dots$.

Момент инерции твёрдого тела можно вычислить, разделив тело на малые объёмы, которые можно считать материальными точками, и просуммировать их моменты инерции относительно оси вращения. Очевидно, что момент инерции зависит от положения оси вращения.

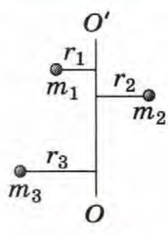


Рис. 6.6

Важно Из определения момента инерции следует, что момент инерции характеризует распределение массы относительно оси вращения.

Приведём значения моментов инерции для некоторых абсолютно твёрдых однородных тел массой m.

Рис. 6.7

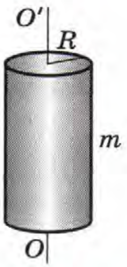


Рис. 6.8

1. Момент инерции *тонкого прямого стержня* длиной l относительно оси, перпендикулярной к стержню и проходящей через его середину (рис. 6.7), равен:

$$I = ml^2/12.$$

2. Момент инерции *прямого цилиндра* (рис. 6.8), или диска относительно оси OO', совпадающей с геометрической осью цилиндра или *диска*:

$$I = mR^2/2.$$

3. Момент инерции *шара* радиусом R относительно оси, проходящей через его центр:

$$I = 2\ mR^2/5.$$

4. Момент инерции *тонкого обруча* радиусом R относительно оси, проходящей через его центр:

$$I = mR^2.$$

Момент инерции по физическому смыслу во вращательном движении играет роль массы, т. е. он характеризует инертность тела по отношению к вращательному движению. Чем больше момент инерции, тем сложнее тело заставить вращаться или, наоборот, остановить вращающееся тело.

Возьмите любое колесо и раскрутите его, а затем попытайтесь его остановить. Прикрепите к ободу несколько шайб или других грузиков и повторите первый опыт. Сделайте вывод о влиянии момента инерции на инертность тела.

Момент силы. Момент инерции. Вращательное движение | Найти

1. Что такое момент силы? момент инерции тела?
2. Какое тело сложнее заставить вращаться — диск или колесо? Массы и радиусы диска и колеса одинаковы.

А1. Момент инерции диска массой 1 кг и диаметром 40 см равен
1) 0,16 кг · м² 2) 0,04 кг · м² 3) 0,02 кг · м² 4) 0

А2. Радиус диска равен 10 см. Момент силы, равной 10 Н и приложенной к ободу диска под углом 150° к радиусу, равен
1) 0,5 Н · м 2) 0,87 Н · м 3) 1 Н · м 4) 0

В3. Установите соответствие между физическими величинами и формулами, определяющими их. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Физическая величина	Формула
А) Момент силы	1) ml^2 2) Fr 3) Fd 4) $ml^2/2$
Б) Момент инерции двух одинаковых маленьких шариков, закреплённых на концах невесомого стержня длиной l, относительно оси, проходящей через центр стержня	

А)	Б)

§ 49 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА, ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕПОДВИЖНОЙ ОСИ

Предположите, почему для увеличения угловой скорости вращения фигурист вытягивается вдоль оси вращения.
Должен ли вращаться вертолёт при вращении его винта?

Заданные вопросы наводят на мысль о том, что если на тело не действуют внешние силы или действие их скомпенсировано и одна часть тела начинает вращение в одну сторону, то другая часть должна вращаться в другую сторону, подобно тому как при выбросе горючего из ракеты сама ракета движется в противоположную сторону.

Момент импульса. Если рассмотреть вращающийся диск, то становится очевидным, что суммарный импульс диска равен нулю, так как любой частице тела соответствует частица, движущаяся с равной по модулю скоростью, но в противоположном направлении (рис. 6.9).

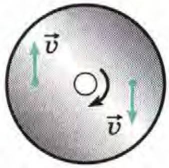


Рис. 6.9

Но диск движется, угловая скорость вращения всех частиц одинакова. Однако ясно, что чем дальше находится частица от оси вращения, тем больше её импульс. Следовательно, для вращательного движения надо ввести ещё одну характеристику, подобную импульсу, — момент импульса.

Запомни **Моментом импульса** частицы, движущейся по окружности, называют произведение импульса частицы на расстояние от неё до оси вращения (рис. 6.10):

$$L = mvr.$$

Линейная и угловая скорости связаны соотношением $v = \omega r$, тогда

$$\boxed{L = mr^2\omega.}$$

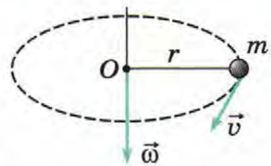


Рис. 6.10

Все точки твёрдого дела движутся относительно неподвижной оси вращения с одинаковой угловой скоростью. Твёрдое тело можно представить как совокупность материальных точек.

Важно Момент импульса твёрдого тела равен произведению момента инерции на угловую скорость вращения:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}. \qquad (6.3)$$

Момент импульса — векторная величина, согласно формуле (6.3) момент импульса направлен так же, как и угловая скорость.

Основное уравнение динамики вращательного движения в импульсной форме. Угловое ускорение тела равно изменению угловой скорости, делённому на промежуток времени, в течение которого это изменение произошло: $\varepsilon = \dfrac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t}$. Подставим это выражение в основное уравнение динамики вращательного движения $I\dfrac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = M$, отсюда $I(\omega_2 - \omega_1) = M\Delta t$, или $I\Delta\omega = M\Delta t$.

Таким образом,

$$\boxed{\Delta L = M\Delta t.} \qquad (6.4)$$

Важно Изменение момента импульса равно произведению суммарного момента сил, действующих на тело или систему, на время действия этих сил.

Сформулируем *закон сохранения момента импульса*.

Закон сохранения момента импульса Если суммарный момент сил, действующих на тело или систему тел, имеющих неподвижную ось вращения, равен нулю, то изменение момента импульса также равно нулю, т. е. момент импульса системы остаётся постоянным:

$$\Delta L = 0,\ L = \text{const}.$$

Вспомните, что изменение импульса системы равно суммарному импульсу сил, действующих на систему.

Интересно Вращающийся фигурист разводит в стороны руки, тем самым увеличивает момент инерции, чтобы уменьшить угловую скорость вращения.

Закон сохранения момента импульса можно продемонстрировать с помощью следующего опыта, называемого «опыт со скамьёй Жуковского». На скамью, имеющую вертикальную ось вращения, проходящую через её центр, встаёт человек. Человек держит в руках гантели. Если скамью заставить вращаться, то человек может изменять скорость вращения, прижимая гантели к груди или опуская руки, а затем разводя их. Разводя руки, он увеличивает момент инерции, и угловая скорость вращения уменьшается (рис. 6.11, *а*), опуская руки, он уменьшает момент инерции, и угловая скорость вращения скамьи увеличивается (рис. 6.11, *б*).

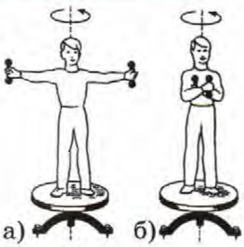


Рис. 6.11

Человек может также заставить вращаться скамью, если пойдёт вдоль её края. При этом скамья будет вращаться в противоположном направлении, так как суммарный момент импульса должен остаться равным нулю.

Интересно На законе сохранения момента импульса основан принцип действия приборов, называемых гироскопами. Основное свойство гироскопа — это сохранение направления оси вращения, если на эту ось не действуют внешние силы. В XIX в. гироскопы использовались мореплавателями для ориентации в море.

Кинетическая энергия вращающегося твёрдого тела. Кинетическая энергия вращающегося твёрдого тела равна сумме кинетических энергий отдельных его частиц. Разделим тело на малые элементы, каждый из которых можно считать материальной точкой. Тогда кинетическая энергия тела равна сумме кинетических энергий материальных точек, из которых оно состоит:

$$E = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \ldots .$$

Угловая скорость вращения всех точек тела одинакова, следовательно,

$$E = \frac{m_1 r_1^2 \omega^2}{2} + \frac{m_2 r_2^2 \omega^2}{2} + \ldots = \frac{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots)\omega^2}{2}.$$

Величина в скобках, как мы уже знаем, это момент инерции твёрдого тела. Окончательно формула для кинетической энергии твёрдого тела, имеющего неподвижную ось вращения, имеет вид

$$\boxed{E_к = \frac{I\omega^2}{2}.}$$

В общем случае движения твёрдого тела, когда ось вращения свободна, его кинетическая энергия равна сумме энергий поступательного и вращательного движений. Так, кинетическая энергия колеса, масса которого сосредоточена в ободе, катящегося по дороге с постоянной скоростью, равна

$$E_к = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mr^2\omega^2}{2} = mv^2.$$

В таблице сопоставлены формулы механики поступательного движения материальной точки с аналогичными формулами вращательного движения твёрдого тела.

Поступательное движение	Вращательное движение
$\vec{v}$ — линейная скорость	$\vec{\omega}$ — угловая скорость
$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ — линейное ускорение	$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$ — угловое ускорение
m — масса	I — момент инерции
$\vec{p} = m\vec{v}$ — импульс	$\vec{L} = I\vec{\omega}$ — момент импульса
$\vec{F}$ — сила	M — момент силы
$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$	$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$
$\vec{F} = m\vec{a}$	$M = I\varepsilon$
$E_к = \frac{mv^2}{2}$	$E_к = \frac{I\omega^2}{2}$
$A = F_s s$	$A = M\varphi$

Момент импульса. Энергия вращательного движения. Гироскоп Найти

1. Что характеризует момент инерции тела?
2. В каком случае справедлив закон сохранения момента импульса?
3. Массы и радиусы диска и кольца равны между собой. Оси вращения проходят через центры кольца и диска. Момент инерции какого тела больше кольца или диска?
4. С одной и той же высоты с наклонной плоскости скатывается диск и соскальзывает брусок. Скорость какого тела будет больше? Считайте, что работа силы трения мала.
5. В течение 0,1 с по касательной к ободу вращающегося колеса действовала сила, равная 10 Н. Чему равно изменение момента импульса колеса?

§ 50 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА»

При решении задач на эту тему следует иметь в виду, что моменты силы, инерции и импульса зависят от выбора оси вращения. Кроме этого, нужно обращать внимание на то, что моменты импульса всех тел записываются относительно одной и той же системы отсчёта.

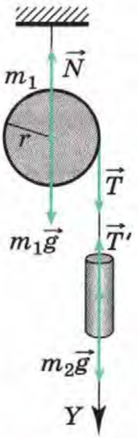


Рис. 6.12

Задача 1. На блок радиусом r и массой m_1 намотана нить, к концу которой привязан груз массой m_2 (рис. 6.12). Груз отпускают, и он движется вниз, раскручивая нить. Определите ускорение груза. Массой нити можно пренебречь.

Решение. Обозначим на рисунке силы, действующие на блок и груз.

На блок действуют сила тяжести $m_1\vec{g}$, сила реакции $\vec{N}$ опоры и сила натяжения $\vec{T}$ нити.

На груз действуют сила тяжести $m_2\vec{g}$ и сила натяжения $\vec{T}'$.

Согласно второму закону Ньютона в проекции на ось Y для груза запишем:

$$m_2a = m_2g - T'. \quad (1)$$

Согласно основному закону динамики вращательного движения для блока запишем:

$$I\varepsilon = Tr. \quad (2)$$

Момент инерции блока $I = \frac{m_1r^2}{2}$. Связь углового и линейного ускорений $a = \varepsilon r$.

Так как по условию задачи нить невесома, то $T = T'$.

Преобразуем уравнение (2): $\frac{m_1r^2}{2}\frac{a}{r} = Tr$, тогда $\frac{m_1a}{2} = T$.

Подставив это выражение в уравнение (1), получим $\left(m_2 + \frac{m_1}{2}\right)a = mg$.

Окончательно $a = \dfrac{m_2g}{m_2 + \frac{m_1}{2}}$.

Задача 2. Скамья Жуковского радиусом 1 м со стоящим в центре человеком вращается, делая 2 об/с. Человек переходит на край скамьи. Определите изменение угловой скорости вращения скамьи. Масса человека 50 кг, момент инерции скамьи 30 кг · м^2.

Решение. Так как внешние силы — сила тяжести и сила реакции опоры, направленные параллельно оси вращения, не могут изменить момент импульса системы тел «скамья—человек», то согласно закону сохранения импульса

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2. \quad (1)$$

Когда человек находится в центре скамьи, то момент инерции системы равен только моменту инерции скамьи: $I_1 = I_{\text{ск}}$.

После того как человек перешёл на край скамьи, момент инерции системы стал равен $I_2 = I_{ск} + mr^2$.

Угловая скорость связана с числом оборотов в секунду соотношением $\omega_1 = 2\pi n$.

Подставив найденные выражения в уравнение (1), получим $I_{ск}2\pi n = (I_{ск} + mr^2)\omega_2$. Тогда $\omega_2 = \dfrac{I_{ск}2\pi n}{I_{ск} + mr^2}$.

Изменение угловой скорости $\omega_2 - \omega_1 = 2\pi n\dfrac{mr^2}{I_{ск} + mr^2} \approx 3{,}9$ рад/с.

Задача 3. На наклонную плоскость вкатывается колесо, двигавшееся по горизонтальной поверхности со скоростью 4 м/с. Вся масса колеса сосредоточена в ободе. Определите максимальную высоту, на которую поднимется колесо. Работой силы трения можно пренебречь.

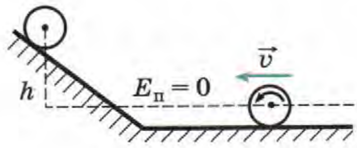


Рис. 6.13

Р е ш е н и е. Выберем нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии так, как показано на рисунке 6.13. Учтём, что момент инерции колеса-обруча $I = mR^2$, а угловая скорость вращения $\omega = v/R$. Механическая энергия колеса на горизонтальной поверхности равна сумме кинетических энергий поступательного и вращательного движений колеса:

$$E_1 = E_к = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} = mv^2.$$

На максимальной высоте механическая энергия равна потенциальной энергии $E_2 = mgh$. Согласно закону сохранения механической энергии получим $E_1 = E_2$, или $mv^2 = mgh$, откуда $h = v^2/g = 1{,}6$ м.

Задача 4. Сплошной цилиндр раскрутили до угловой скорости ω и положили на пол к стенке. Коэффициент трения между стенкой, полом и цилиндром μ, радиус цилиндра R. Определите, сколько оборотов сделает цилиндр до остановки.

Р е ш е н и е. Решаем задачу, используя теорему об изменении кинетической энергии. При этом учтём, что ось вращения цилиндра неподвижна, момент инерции цилиндра относительно этой оси равен $I = \dfrac{mR^2}{2}$, соответственно кинетическая энергия цилиндра вначале равна $E_к = \dfrac{I\omega^2}{2} = \dfrac{mR^2\omega^2}{4}$.

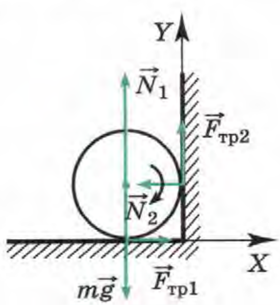


Рис. 6.14

Изменение кинетической энергии равно алгебраической сумме работ сил, действующих на него:

$$0 - \frac{mv^2}{2} = \sum A_i.$$

На цилиндр (рис. 6.14) действуют силы тяжести $m\vec{g}$, реакции опоры $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$ и силы трения $\vec{F}_{тр1}$, $\vec{F}_{тр2}$.

Так как перемещается относительно стенок угла только точка приложения сил трения, то работу совершают только силы трения. В связи с этим справедливо уравнение

$$0 - \frac{mR^2\omega^2}{4} = A_{\text{тр}1} + A_{\text{тр}2}. \quad (1)$$

Работы сил трения равны $A_{\text{тр}1} = -F_{\text{тр}1}2\pi Rn$; $A_{\text{тр}2} = -F_{\text{тр}2}2\pi Rn$, где n — число полных оборотов цилиндра до остановки, а силы трения определяются силами реакции опоры стенок на цилиндр: $F_{\text{тр}1} = \mu N_1$; $F_{\text{тр}2} = \mu N_2$.

Найдём силы реакции опоры.

По условию задачи цилиндр только вращается, его центр тяжести не движется, следовательно, векторная сумма сил, действующих на него, равна нулю:

$$m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тр}1} + \vec{F}_{\text{тр}2} = 0.$$

В проекциях на оси OX и OY имеем

$$F_{\text{тр}1} - N_2 = 0; \quad (2)$$

$$N_1 + F_{\text{тр}2} - mg = 0. \quad (3)$$

Подставив в уравнения (2) и (3) выражения для сил трения, получим

$$\mu N_1 - N_2 = 0; \quad (4)$$

$$N_1 + \mu N_2 - mg = 0. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (4) и (5), найдём силы реакции опоры:

$$N_1 = \frac{mg}{1 + \mu^2}; \quad N_2 = \frac{\mu mg}{1 + \mu^2}.$$

Подставив найденные выражения в уравнение (1), имеем

$$\frac{mR^2\omega^2}{4} = \mu\frac{mg}{1 + \mu^2}2\pi Rn(1 + \mu).$$

Тогда число оборотов до остановки цилиндра $n = \dfrac{\omega^2 R(1 + \mu^2)}{8\pi\mu g(1 + \mu)}$.

Задачи для самостоятельного решения

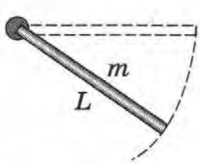


Рис. 6.15

1. На блок радиусом 10 см и массой 1 кг по касательной действует сила 6 Н. Определите, через какой промежуток времени скорость блока станет равной 5 рад/с.

2. На шарнире в горизонтальном положении удерживают однородный стержень длиной 60 см и массой 1 кг (рис. 6.15). Стержень отпускают, и он начинает вращение. Определите максимальную линейную скорость стержня в тот момент, когда он проходит положение равновесия. Какая точка стержня будет двигаться с этой скоростью? Момент инерции стержня $I = mL^2/3$.

Повторите материал главы 6 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.

2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.

3. Укажите единицы физических величин, характеризующих вращательное движение твёрдого тела, и их выражение через основные единицы СИ.

4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

СТАТИКА

ГЛАВА 7 РАВНОВЕСИЕ АБСОЛЮТНО ТВЁРДЫХ ТЕЛ

§ 51 РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ

Вспомните, что такое момент силы.
При каких условиях тело находится в покое?

Если тело находится в покое относительно выбранной системы отсчёта, то говорят, что это тело находится в равновесии. Здания, мосты, балки вместе с опорами, части машин, книга на столе и многие другие тела покоятся, несмотря на то что к ним со стороны других тел приложены силы. Задача изучения условий равновесия тел имеет большое практическое значение для машиностроения, строительного дела, приборостроения и других областей техники. Все реальные тела под влиянием приложенных к ним сил изменяют свою форму и размеры, или, как говорят, деформируются.

Во многих случаях, которые встречаются на практике, деформации тел при их равновесии незначительны. В этих случаях деформациями можно пренебречь и вести расчёт, считая тело *абсолютно твёрдым*.

Для краткости абсолютно твёрдое тело будем называть *твёрдым телом* или просто *телом*. Изучив условия равновесия твёрдого тела, мы найдём условия равновесия реальных тел в тех случаях, когда их деформации можно не учитывать.

Вспомните определение абсолютно твёрдого тела.

Запомни Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия абсолютно твёрдых тел, называется **статикой**.

В статике учитываются размеры и форма тел, в этом случае существенным является не только значение сил, но и положение точек их приложения.

Выясним вначале с помощью законов Ньютона, при каком условии любое тело будет находиться в равновесии. С этой целью разобьём мысленно всё тело на большое число малых элементов, каждый из которых можно рассматривать как материальную точку. Как обычно, назовём силы, действующие на тело со стороны других тел, внешними, а силы, с которыми взаимодействуют элементы самого тела, внутренними (рис. 7.1). Так, сила $\vec{F}_{1,2}$ — это сила, действующая на элемент *1* со стороны элемента *2*. Сила же $\vec{F}_{2,1}$ действует на элемент *2* со стороны элемента *1*. Это внутренние силы; к ним относятся также силы $\vec{F}_{1,3}$ и $\vec{F}_{3,1}$, $\vec{F}_{2,3}$ и $\vec{F}_{3,2}$. Очевидно, что

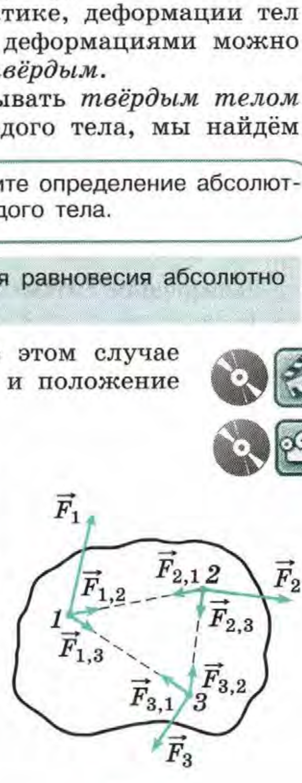


Рис. 7.1

Интересно Статика — частный случай динамики, так как покой тел, когда на них действуют силы, есть частный случай движения ($\vec{v} = 0$).

геометрическая сумма внутренних сил равна нулю, так как согласно третьему закону Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, $\vec{F}_{23} = -\vec{F}_{32}$, $\vec{F}_{31} = -\vec{F}_{13}$ и т. д.

На каждый элемент в общем случае может действовать несколько внешних сил. Под $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$ и т. д. будем понимать все внешние силы, приложенные соответственно к элементам *1*, *2*, *3*, ... Точно так же через $\vec{F}_1'$, $\vec{F}_2'$, $\vec{F}_3'$ и т. д. обозначим геометрическую сумму внутренних сил, приложенных к элементам *1*, *2*, *3*, ... соответственно (эти силы не показаны на рисунке), т. е. $\vec{F}_1' = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \ldots$, $\vec{F}_2' = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{22} + \ldots$, $\vec{F}_3' = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} + \ldots$ и т. д.

Если тело находится в покое, то ускорение каждого элемента равно нулю. Поэтому согласно второму закону Ньютона будет равна нулю и геометрическая сумма всех сил, действующих на любой элемент. Следовательно, можно записать:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_1' = 0,\ \vec{F}_2 + \vec{F}_2' = 0,\ \vec{F}_3 + \vec{F}_3' = 0. \tag{7.1}$$

Каждое из этих трёх уравнений выражает условие равновесия элемента твёрдого тела.

Первое условие равновесия твёрдого тела. Выясним, каким условиям должны удовлетворять внешние силы, приложенные к твёрдому телу, чтобы оно находилось в равновесии. Для этого сложим уравнения (7.1):

$$(\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots) + (\vec{F}_1' + \vec{F}_2' + \vec{F}_3' + \ldots) = 0.$$

В первых скобках этого равенства записана векторная сумма всех внешних сил, приложенных к телу, а во вторых — векторная сумма всех внутренних сил, действующих на элементы этого тела. Но, как известно, векторная сумма всех внутренних сил системы равна нулю, так как согласно третьему закону Ньютона любой внутренней силе соответствует сила, равная ей по модулю и противоположная по направлению. Поэтому в левой части последнего равенства останется только геометрическая сумма внешних сил, приложенных к телу:

$$\boxed{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots = 0.} \tag{7.2}$$

Запомни В случае абсолютно твёрдого тела условие (7.2) называют **первым условием его равновесия**.

Оно является необходимым, но не является достаточным.

Итак,

Важно если твёрдое тело находится в равновесии, то геометрическая сумма внешних сил, приложенных к нему, равна нулю.

Если сумма внешних сил равна нулю, то равна нулю и сумма проекций этих сил на оси координат. В частности, для проекций внешних сил на ось OX можно записать:

$$F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \ldots = 0. \tag{7.3}$$

Такие же уравнения можно записать и для проекций сил на оси OY и OZ.

Второе условие равновесия твёрдого тела. Убедимся, что условие (7.2) является необходимым, но недостаточным для равновесия твёрдого тела. Приложим к доске, лежащей на столе, в различных точках две равные по модулю и противоположно направленные силы так, как показано на рисунке 7.2. Сумма этих сил равна нулю: $\vec{F} + (-\vec{F}) = 0$. Но доска тем не менее будет поворачиваться. Точно так же две одинаковые по модулю и противоположно направленные силы поворачивают руль велосипеда или автомобиля (рис. 7.3).

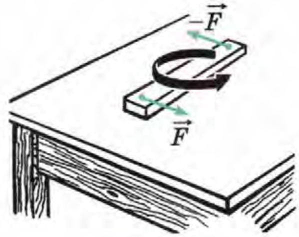


Рис. 7.2

Какое же ещё условие для внешних сил, кроме равенства нулю их суммы, должно выполняться, чтобы твёрдое тело находилось в равновесии? Воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии.

Рис. 7.3

Найдём, например, условие равновесия стержня, шарнирно закреплённого на горизонтальной оси в точке O (рис. 7.4). Это простое устройство, как вам известно из курса физики основной школы, представляет собой рычаг первого рода.

Пусть к рычагу приложены перпендикулярно стержню силы $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$.

Кроме сил $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$, на рычаг действует направленная вертикально вверх сила нормальной реакции $\vec{F_3}$ со стороны оси рычага. При равновесии рычага сумма всех трёх сил равна нулю: $\vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} = 0$.

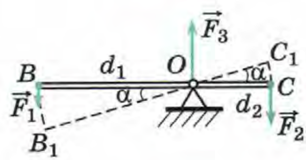


Рис. 7.4

Вычислим работу, которую совершают внешние силы при повороте рычага на очень малый угол α. Точки приложения сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ пройдут пути $s_1 = BB_1$ и $s_2 = CC_1$ (дуги BB_1 и CC_1 при малых углах α можно считать прямолинейными отрезками). Работа $A_1 = F_1 s_1$ силы $\vec{F_1}$ положительна, потому что точка B перемещается по направлению действия силы, а работа $A_2 = -F_2 s_2$ силы $\vec{F_2}$ отрицательна, поскольку точка C движется в сторону, противоположную направлению силы $\vec{F_2}$. Сила $\vec{F_3}$ работы не совершает, так как точка её приложения не перемещается.

Пройденные пути s_1 и s_2 можно выразить через угол поворота рычага α, измеренный в радианах: $s_1 = \alpha|BO|$ и $s_2 = \alpha|CO|$. Учитывая это, перепишем выражения для работы так:

$$\begin{aligned} A_1 &= F_1\alpha|BO|, \\ A_2 &= -F_2\alpha|CO|. \end{aligned} \qquad (7.4)$$


Обсудите с одноклассниками примеры, показанные на рисунках 7.2 и 7.3. Рассмотрите силы, действующие на отдельные элементы доски и руля.

Радиусы BO и CO дуг окружностей, описываемых точками приложения сил $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$, являются перпендикулярами, опущенными из оси вращения на линии действия этих сил.

Как вы уже знаете, плечо силы — это кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы. Будем обозначать плечо силы буквой d. Тогда $|BO| = d_1$ — плечо силы $\vec{F_1}$, а $|CO| = d_2$ — плечо силы $\vec{F_2}$. При этом выражения (7.4) примут вид

$$A_1 = F_1\alpha d_1,\ A_2 = -F_2\alpha d_2. \quad (7.5)$$

Из формул (7.5) видно, что работа каждой из сил равна произведению момента силы на угол поворота рычага. Следовательно, выражения (7.5) для работы можно переписать в виде

$$A_1 = M_1\alpha,\ A_2 = M_2\alpha, \quad (7.6)$$

а полную работу внешних сил можно выразить формулой

$$A = A_1 + A_2 = (M_1 + M_2)\alpha. \quad (7.7)$$

Так как момент силы $\vec{F_1}$ положителен и равен $M_1 = F_1d_1$ (см. рис. 7.4), а момент силы $\vec{F_2}$ отрицателен и равен $M_2 = -F_2d_2$, то для работы A можно записать выражение

$$A = (M_1 - |M_2|)\alpha.$$

Когда тело приходит в движение, его кинетическая энергия увеличивается. Для увеличения кинетической энергии внешние силы должны совершать работу, т. е. в этом случае $A \neq 0$ и соответственно $M_1 + M_2 \neq 0$.

Приведите примеры рычагов первого и второго рода. Изменится ли вывод условия равновесия, если мы используем рычаг второго рода?

Если работа внешних сил равна нулю, то кинетическая энергия тела не изменяется (остаётся равной нулю) и тело остаётся неподвижным. Тогда

$$\boxed{M_1 + M_2 = 0.} \quad (7.8)$$

Запомни Уравнение (7.8) и есть **второе условие равновесия твёрдого тела**.

Важно При равновесии твёрдого тела сумма моментов всех внешних сил, действующих на него относительно любой оси, равна нулю.

Итак, в случае произвольного числа внешних сил условия равновесия абсолютно твёрдого тела следующие:

$$\boxed{\begin{aligned} &\vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} + \ldots = 0, \\ &M_1 + M_2 + M_3 + \ldots = 0. \end{aligned}} \quad (7.9)$$

Второе условие равновесия можно вывести из основного уравнения динамики вращательного движения твёрдого тела. Согласно этому уравнению $\varepsilon = \dfrac{M}{I}$, где M — суммарный момент сил, действующих на тело, $M = M_1 + M_2 + M_3 + \ldots$, ε — угловое ускорение. Если твёрдое тело неподвижно, то $\varepsilon = 0$, и, следовательно, $M = 0$. Таким образом, второе условие равновесия имеет вид $M = M_1 + M_2 + M_3 + \ldots = 0$.

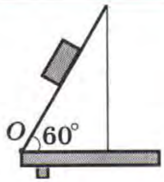
Интересно

Если тело не абсолютно твёрдое, то под действием приложенных к нему внешних сил оно может и не оставаться в равновесии, хотя сумма внешних сил и сумма их моментов относительно любой оси равны нулю.
Приложим, например, к концам резинового шнура две силы, равные по модулю и направленные вдоль шнура в противоположные стороны. Под действием этих сил шнур не будет находиться в равновесии (шнур растягивается), хотя сумма внешних сил равна нулю и нулю равна сумма их моментов относительно оси, проходящей через любую точку шнура.

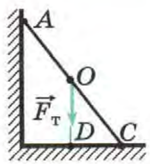
Условия равновесия твёрдого тела | Найти

1. Вспомните, что называется центром тяжести тела или системы тел.
2. Что называют моментом силы?
3. Какие условия необходимы и достаточны для равновесия твёрдого тела?

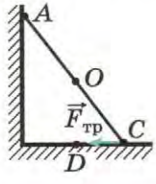
A1. При выполнении лабораторной работы ученик установил наклонную плоскость под углом 60° к поверхности стола. Длина плоскости равна 0,6 м. Момент силы тяжести бруска массой 0,1 кг относительно точки O при прохождении им середины наклонной плоскости равен
1) 0,15 Н · м 2) 0,30 Н · м 3) 0,45 Н · м 4) 0,60 Н · м



A2. На рисунке схематически изображена лестница AC, опирающаяся на стену. Чему равен момент силы тяжести, действующей на лестницу, относительно точки C?
1) 0 2) $F_т \cdot OD$ 3) $F_т \cdot AC$ 4) $F_т \cdot DC$



A3. На рисунке схематически изображена лестница AC, опирающаяся на стену. Чему равен момент силы трения, действующей на лестницу, относительно точки D?
1) 0 2) $F_{тр} \cdot OC$ 3) $F_{тр} \cdot AO$ 4) $F_{тр} \cdot CD$



§ 52 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ»

При решении задач статики надо использовать условия равновесия (7.9). Причём от векторного уравнения для суммы сил следует перейти к проекциям сил на координатные оси. Иногда удобнее решать задачу, используя геометрическое правило сложения векторов. При равновесии многоугольник сил должен быть замкнутым, так как сумма сил равна нулю (подобный пример будет рассмотрен ниже).

При записи для правила моментов сил надо подумать, как выбрать ось, чтобы плечи сил определялись наиболее просто и в сумме моментов сил содержалось меньше слагаемых.

В задачах часто рассматриваются стержни, которые скрепляются шарнирно. При этом имеется в виду, что трение в шарнире отсутствует.

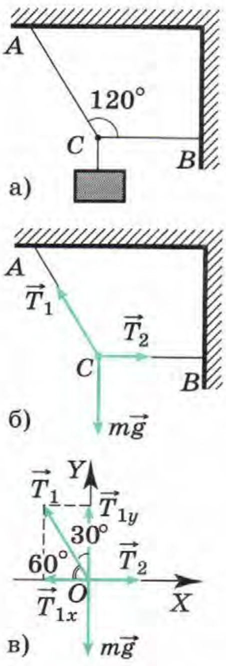


Рис. 7.5

Задача 1. Груз висит на двух тросах (рис. 7.5, *а*). Угол ACB равен 120°. Сила тяжести, действующая на груз, равна 600 Н. Определите силы натяжения тросов AC и CB.

Решение. Силы натяжения тросов обозначим через $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$. Эти силы направлены вдоль тросов от точки C (рис. 7.5, *б*). Кроме этих сил, на точку C действует сила тяжести $m\vec{g}$. Точка C находится в равновесии. Следовательно, сумма сил, действующих на неё, равна нулю: $\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + m\vec{g} = 0$.

Оси координат выберем так, как показано на рисунке 7.5, *в*. При равновесии сумма проекций всех сил на оси координат равна нулю:

$$T_{1x} + T_{2x} + mg_x = 0,\ T_{1y} + T_{2y} + mg_y = 0,$$

или

$$T_2 - T_1\cos 60^\circ = 0,\ T_1\cos 30^\circ - mg = 0.$$

Отсюда $T_1 = \dfrac{mg}{\cos 30^\circ} \approx 690$ Н, $T_2 = T_1\cos 60^\circ \approx 345$ Н.

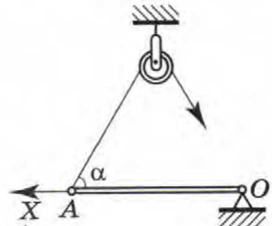
Задача 2. Дверь люка AO, которая может поворачиваться в шарнире O без трения, удерживается в горизонтальном положении верёвкой (рис. 7.6, *а*). Определите натяжение верёвки и силу реакции шарнира, если верёвка образует с дверью угол $\alpha = 60^\circ$. Дверь однородна и на неё действует сила тяжести 300 Н.

Решение. На дверь люка действуют три силы (рис. 7.6, *б*): сила тяжести $m\vec{g}$, приложенная к середине двери в точке D, сила натяжения $\vec{T}$ со стороны верёвки и сила реакции $\vec{N}$ со стороны шарнира.

Выберем оси координат так, как показано на рисунке 7.6, *б*. Поскольку дверь находится в равновесии, то сумма моментов всех сил относительно, например, шарнира равна нулю: $M_1 + M + M_2 = 0$.

Здесь M_1, M, M_2 — моменты сил $\vec{T}$, $m\vec{g}$ и $\vec{N}$.

Найдём плечи этих сил, обозначив $|AO| = l$. Тогда $OD = l/2$ — плечо силы $m\vec{g}$, $CO = AO\sin\alpha = l\sin\alpha$ — плечо силы $\vec{T}$. Плечо силы $\vec{N}$ равно нулю, так как она приложена в шарнире.



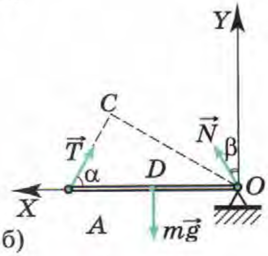


Рис. 7.6

Значит, $M_1 = -Tl\sin\alpha$, $M = mg\dfrac{l}{2}$, $M_2 = 0$.

Теперь запишем правило моментов сил, учитывая знаки этих моментов: $-Tl\sin\alpha + mg\dfrac{l}{2} + 0 = 0$.

Отсюда находим силу натяжения верёвки:

$$T = \frac{mg}{2}\frac{1}{\sin\alpha} \approx 173\ \text{Н}.$$

Для нахождения силы реакции шарнира воспользуемся первым условием равновесия:

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{N} = 0.$$

Запишем это векторное уравнение в проекциях на координатные оси:

$$-T_x + N_x = 0,\ T_y + N_y - mg = 0,$$

или $N_x = T\cos\alpha$, $N_y = mg - T\sin\alpha = \dfrac{mg}{2}$.

Отсюда $N_x = 86{,}5$ Н; $N_y = 150$ Н.

Модуль силы $\vec{N}$ равен $N = \sqrt{N_y^2 + N_x^2}$; $N = 173$ Н.

Угол, который образует сила $\vec{N}$ с координатной осью OY:

$$\cos\beta = \frac{N_y}{N},\ \beta = 30^\circ.$$

Задача 3. Лестница прислонена к стене. При каком минимальном угле наклона к полу она не будет падать? Коэффициенты трения между лестницей и стеной и между лестницей и полом соответственно равны μ_1 и μ_2.

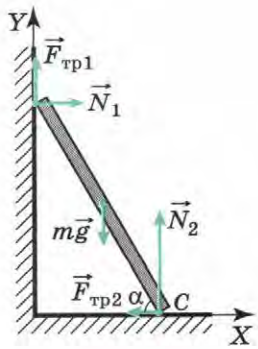


Рис. 7.7

Р е ш е н и е. На лестницу действуют следующие силы (рис. 7.7): тяжести $m\vec{g}$, нормальной реакции со стороны стены $\vec{N}_1$ и пола $\vec{N}_2$, трения $\vec{F}_{\text{тр1}}$ и $\vec{F}_{\text{тр2}}$.

Первое условие равновесия для лестницы имеет вид

$$m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_{\text{тр1}} + \vec{F}_{\text{тр2}} = 0. \qquad (1)$$

Для записи правила моментов выберем ось вращения, проходящую через точку C, и запишем:

$$mg\frac{l}{2}\cos\alpha - N_1 l\sin\alpha - F_{\text{тр1}} l\cos\alpha = 0.$$

Из последнего уравнения следует: $\mathrm{tg}\alpha = \dfrac{\dfrac{mg}{2} - F_{тр1}}{N_1}$.

Выразим силы N_1 и $F_{тр1}$ через силу тяжести. Для этого запишем уравнение (1) в проекциях на оси координат:

на ось X: $N_1 - F_{тр2} = 0$,

на ось Y: $F_{тр1} + N_2 - mg = 0$.

По условию задачи требуется найти минимальное значение угла α_{min}, поэтому берём максимальные значения сил трения, т. е. $F_{тр1} = \mu_1 N_1$ и $F_{тр2} = \mu_2 N_2$.

Тогда $N_1 = \dfrac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1\mu_2}$ и $\mathrm{tg}\alpha_{min} = \dfrac{1 - \mu_1\mu_2}{2\mu_2}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Для запуска планера применяют резиновый канат. Определите силу, с которой планер действует на канат, в тот момент, когда две половины каната составляют между собой угол 90°, а каждая из них растянута силой 500 Н.

2. К концу рукоятки гаечного ключа длиной 20 см приложена сила 50 Н под углом 60° по отношению к рукоятке ключа. Определите момент этой силы.

3. Человек, открывая дверь, прикладывает силу 4 Н, которая направлена под углом 60° к плоскости двери в горизонтальном направлении. Момент силы равен 3,5 Н · м. Определите расстояние от ручки до оси вращения двери.

4. Труба массой 14 кг лежит на земле. Какую силу надо приложить к одному из концов трубы, чтобы его слегка приподнять?

5. На трапеции сидит гимнаст массой 60 кг. Он расположен на расстоянии 1/3 её длины, считая от одного из её концов. Определите натяжение тросов, на которых подвешена трапеция.

Повторите материал главы 7 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие основные закономерности.

«Статика — частный случай динамики»

1. Различные виды равновесия тел. Эксперименты, показывающие равновесие тел. Гимнаст на канате.
2. Центр тяжести и центр масс. Экспериментальное определение центра тяжести.

«Исследование условий равновесия плавающего тела»

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ПОЧЕМУ ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ИЗУЧАЮТСЯ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Дадим ряд определений и понятий, которые в дальнейшем будем использовать и уточнять. Сформулируем основные задачи молекулярной физики.

Макроскопические тела. Мы живём в мире макроскопических тел. Наше тело — это тоже макроскопическое тело.

Запомни В физике **макроскопическими телами** называются тела, состоящие из огромного числа молекул.

Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар — всё это примеры макроскопических тел.

Интересно В механике Ньютона имеют дело с механическим движением макроскопических тел — перемещением одних тел относительно других в пространстве с течением времени.

Механика и механическое движение.

Механика изучает движение тел, но она не в состоянии объяснить, почему существуют твёрдые, жидкие и газообразные тела и почему эти тела могут переходить из одного состояния в другое. Исследование внутренних свойств тел не входит в задачу механики.

В механике говорят о силах как причинах изменения скоростей тел, но природа этих сил, их происхождение не выясняются. Остаётся непонятным, почему при сжатии тел появляются силы упругости, почему возникает трение. На многие, очень многие вопросы механика Ньютона ответов не даёт. Это хорошо понимал и сам Ньютон.

Интересно «Я не знаю, чем я кажусь миру; мне самому кажется, что я был только мальчиком, играющим на берегу моря и развлекающимся тем, что от времени до времени находил более гладкие камушки или более красивую раковину, чем обыкновенно, в то время как Великий океан истины лежал передо мной совершенно неразгаданным». И. Ньютон.

Тепловые явления.

Запомни Явления, связанные с нагреванием или охлаждением тел, с изменением их температуры, называются **тепловыми**.

Механическое движение не вызывает в теле каких-либо существенных изменений, если не происходит катастрофических столкновений. Но нагревание или охлаждение тела способно изменить его до неузнаваемости. Сильно нагрев прозрачную, но всё же видимую воду, мы превратим её в невидимый пар. Сильное охлаждение превратит воду в кусок льда. Если вдуматься, то эти явления загадочны и удивительны, они не вызывают нашего изумления лишь потому, что мы привыкли к ним с детства.

Важно Надо найти законы, которые могли бы объяснить изменения в телах, когда сами тела неподвижны и когда с точки зрения механики с ними не происходит ничего. Эти законы описывают особый вид движения материи — **тепловое движение**, присущее всем макроскопическим телам независимо от того, перемещаются они в пространстве или нет.

Тепловое движение молекул. Все тела состоят из атомов и молекул. Тепловые явления происходят внутри тел и всецело определяются движением этих частиц. Движение атомов и молекул мало напоминает движение собаки или автомобиля. Атомы и молекулы вещества совершают беспорядочное движение, в котором трудно усмотреть следы какого-либо порядка и регулярности.

Запомни Беспорядочное движение молекул называют **тепловым движением**.

Движение молекул беспорядочно из-за того, что число их в телах, которые нас окружают, необозримо велико. Каждая молекула беспрестанно меняет свою скорость при столкновениях с другими молекулами. В результате траектория её движения оказывается чрезвычайно запутанной, само движение — хаотичным, несравненно более хаотичным, чем движение муравьёв в разорённом муравейнике.

Беспорядочное движение огромного числа молекул качественно отличается от упорядоченного механического перемещения тел. Оно представляет собой особый вид движения материи со своими особыми свойствами. Об этих свойствах и пойдёт речь в дальнейшем.

Значение тепловых явлений. Привычный облик нашей планеты существует и может существовать только в довольно узком интервале температур. Если бы температура превысила 100 °C, то на Земле при обычном атмосферном давлении не было бы рек, морей и океанов, не было бы воды вообще. Вся вода превратилась бы в пар. А при понижении температуры на несколько десятков градусов океаны превратились бы в громадные ледники.

Даже изменение температуры лишь на 20—30 °C при смене времён года меняет на средних широтах облик этого участка Земли.

С наступлением весны начинается пробуждение природы. Леса одеваются листвой, начинают зеленеть луга. Зимой же жизнь растений замирает. Толстый слой снега покрывает поверхность Земли.

Температура животных и человека поддерживается внутренними механизмами терморегуляции на строго определённом уровне. При этом интервал возможных значений температуры в данном случае очень мал. Достаточно температуре повыситься на несколько десятых градуса, как мы уже чувствуем себя нездоровыми. Изменение же температуры на несколько градусов ведёт к гибели организмов. Поэтому неудивительно, что тепловые явления привлекали внимание людей с древнейших времён. Умение добывать и поддерживать огонь сделало человека относительно независимым от колебаний температуры окружающей среды. Это было одним из величайших изобретений человечества.

Изменение температуры оказывает влияние на все свойства тел. Так, при нагревании или охлаждении изменяются размеры твёрдых тел и объёмы жидкостей. Значительно меняются механические свойства тел, например упругость. Кусок резиновой трубки уцелеет, если ударить по нему молотком. Но при охлаждении до температуры ниже −100 °C резина становится хрупкой, как стекло, и от лёгкого удара резиновая трубка разбивается на мелкие кусочки. Лишь после нагревания резина вновь обретает свои упругие свойства.

Кроме механических свойств, при изменении температуры меняются и другие свойства тел, например сопротивление проводника, магнитные свойства, цвет тела и др. Так, если сильно нагреть постоянный магнит, то он перестанет притягивать железные предметы, остывающие угли изменяют цвет от голубого до жёлтого, постепенно становясь красными.

М. В. Ломоносов
(1711—1765)

Все перечисленные выше и многие другие тепловые явления подчиняются определённым законам. Открытие законов, определяющих тепловые явления, позволяет эффективно применять эти явления на практике и использовать в технике. Современные тепловые двигатели, установки для сжижения газов, холодильные аппараты и многие другие устройства конструируют на основе этих законов.

Молекулярно-кинетическая теория. Ещё философы древности догадывались о том, что теплота — это вид внутреннего движения. Но только в XVIII в. начала развиваться последовательная *молекулярно-кинетическая теория.*

Важно Молекулярно-кинетическая теория даёт объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся частиц.

Большой вклад в развитие молекулярно-кинетической теории был сделан М. В. Ломоносовым. Он рассматривал теплоту как вращательное движение частиц тела.

Важность этой теории для объяснения многих явлений природы трудно переоценить.

ГЛАВА 8 ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 53 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

Какие физические объекты (системы) изучает молекулярная физика?
Как различить механические и тепловые явления?
Приведите примеры тепловых явлений, происходящих в классе, дома, на улице.

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат три утверждения:

Важно 1) вещество состоит из частиц; 2) эти частицы беспорядочно движутся; 3) частицы взаимодействуют друг с другом.

Каждое утверждение строго доказано с помощью опытов.

Свойства и поведение всех без исключения тел определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц: молекул, атомов или ещё более малых образований — элементарных частиц.

Оценка размеров молекул. Для полной уверенности в существовании молекул надо определить их размеры. Проще всего это сделать, наблюдая расплывание капельки масла, например оливкового, по поверхности воды. Масло никогда не займёт всю поверхность, если мы возьмём достаточно широкий сосуд (рис. 8.1). Нельзя заставить капельку объёмом 1 мм^3 расплыться так, чтобы она заняла площадь поверхности более 0,6 м^2. Предположим, что при растекании масла по максимальной площади оно образует слой толщиной всего лишь в одну молекулу — «мономолекулярный слой». Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы оливкового масла.

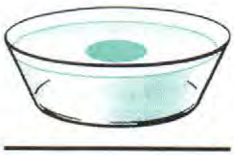


Рис. 8.1

Обсудите с одноклассником, можно ли доказать первое утверждение, проведя опыт по окрашиванию воды кристалликом марганцовокислого калия?
Подумайте, о чём свидетельствует явление распространения запахов ароматических веществ в помещении.
Подумайте, как экспериментально доказать, что частицы вещества притягиваются и отталкиваются.

Объём V слоя масла равен произведению его площади поверхности S на толщину d слоя, т. е. $V = Sd$. Следовательно, линейный размер молекулы оливкового масла равен:

$$d = \frac{0{,}001\ \text{см}^2}{6000\ \text{см}^2} \approx 1{,}7 \cdot 10^{-7}\ \text{см}.$$

Современные приборы позволяют увидеть и даже измерить отдельные атомы и молекулы. На рисунке 8.2 показана микрофотография поверхности кремниевой пластины, где бугорки — это отдельные атомы кремния. Подобные изображения впервые научились получать в 1981 г. с помощью сложных туннельных микроскопов.

Рис. 8.2

Размеры молекул, в том числе и оливкового масла, больше размеров атомов. Диаметр любого атома примерно равен 10^{-8} см. Эти размеры так малы, что их трудно себе представить. В таких случаях прибегают к помощи сравнений.

Вот одно из них. Если пальцы сжать в кулак и увеличить его до размеров земного шара, то атом при том же увеличении станет размером с кулак.

Число молекул. При очень малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле огромно. Подсчитаем примерное число молекул в капле воды массой 1 г и, следовательно, объёмом 1 см^3.

Диаметр молекулы воды равен примерно $3 \cdot 10^{-8}$ см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объём $(3 \cdot 10^{-8}\ \text{см})^3$, можно найти число молекул в капле, разделив объём капли (1 см^3) на объём, приходящийся на одну молекулу:

Интересно

При каждом вдохе вы захватываете столько молекул, что если бы все они после выдоха равномерно распределились в атмосфере Земли, то каждый житель планеты при вдохе получил бы две-три молекулы, побывавшие в ваших лёгких.

$$N = \frac{1\ \text{см}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3} \approx 3{,}7 \cdot 10^{22}.$$

Масса молекул. Массы отдельных молекул и атомов очень малы. Мы вычислили, что в 1 г воды содержится $3{,}7 \cdot 10^{22}$ молекул. Следовательно, масса одной молекулы воды (H_2O) равна:

$$m_{0H_2O} = \frac{1\ \text{г}}{3{,}7 \cdot 10^{22}} \approx 2{,}7 \cdot 10^{-23}\ \text{г}. \qquad (8.1)$$

Массу такого же порядка имеют молекулы других веществ, исключая огромные молекулы органических веществ; например, белки имеют массу, в сотни тысяч раз большую, чем масса отдельных атомов. Но всё равно их массы в макроскопических масштабах (граммах и килограммах) чрезвычайно малы.

Относительная молекулярная масса. Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчётах не абсолютные значения масс, а относительные.

Важно

По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс).

Запомни

Относительной молекулярной (или атомной) массой M_r вещества называют отношение массы m_0 молекулы (или атома) данного вещества к $\frac{1}{12}$ массы m_{0C} атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}. \qquad (8.2)$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены. Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить относительную молекулярную массу вещества. Например, относительная молекулярная масса углекислого газа CO_2 приближённо равна 44, так как относительная атомная масса углерода практически равна 12, а кислорода примерно 16: $12 + 2 \cdot 16 = 44$.

Интересно

Сравнение атомов и молекул с $\frac{1}{12}$ массы атома углерода было принято в 1961 г. Главная причина такого выбора состоит в том, что углерод входит в огромное число различных химических соединений. Множитель $\frac{1}{12}$ введён для того, чтобы относительные массы атомов были близки к целым числам.

Откройте в электронном приложении таблицу Менделеева и посчитайте относительную молекулярную массу некоторых известных вам молекул.

Количество вещества и постоянная Авогадро. *Количество вещества* наиболее естественно было бы измерять числом молекул или атомов в теле. Но число молекул в любом макроскопическом теле так велико, что в расчётах используют не абсолютное число молекул, а относительное их число.

В Международной системе единиц количество вещества выражают в *молях*.

Запомни

Один моль — это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в углероде массой 0,012 кг.

Значит, в одном моле любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул.

Запомни

Число атомов или молекул, содержащихся в веществе, взятом в количестве 1 моль, обозначают N_A и называют **постоянной Авогадро** в честь итальянского учёного (XIX в.).

Для определения постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода. Приближённая оценка массы может быть произведена так, как это было сделано выше для массы молекулы воды (наиболее точные методы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем).

Для массы атома углерода измерения дают: $m_{0C} = 1{,}995 \cdot 10^{-26}$ кг.

Постоянную Авогадро N_A можно определить, разделив массу углерода, взятого в количестве одного моля, на массу одного атома углерода:

$$N_A = 0{,}012\,\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{m_{0C}} = 0{,}012\,\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{1{,}995 \cdot 10^{-26}\ \text{кг}} \approx 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}.$$

$$\boxed{N_A \approx 6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}.} \qquad (8.3)$$

Наименование *моль*$^{-1}$ указывает на то, что N_A — число атомов в одном моле любого вещества. Если, например, количество вещества $\nu = 2{,}5$ моль, то число молекул в теле $N_A = \nu N_A = 1{,}5 \cdot 10^{24}$. Отсюда видно, что

Важно

количество вещества равно отношению числа N молекул в данном теле к постоянной Авогадро N_A, т. е. к числу молекул в одном моле вещества:

$$\nu = N/N_A. \qquad (8.4)$$

Подумайте, можно ли по числу молей сравнивать массы двух разных веществ.

Огромное числовое значение постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими. Тело, обладающее количеством вещества 1 моль, имеет привычные для нас макроскопические размеры и массу порядка нескольких десятков граммов.

Молярная масса. Наряду с относительной молекулярной массой M_r в физике и химии широко используют понятие *молярная масса.*

Запомни **Молярной массой *M*** вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

Согласно такому определению молярная масса вещества равна произведению массы молекулы на постоянную Авогадро:

$$\boxed{M = m_0 N_A.} \tag{8.5}$$

Масса m любого количества вещества равна произведению массы одной молекулы на число молекул в теле:

$$m = m_0 N. \tag{8.6}$$

Заменив N_A и N в формуле (8.4) их выражениями из формул (8.5) и (8.6), получим

$$\nu = m/M. \tag{8.7}$$

Важно Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе.

Именно такое определение количества вещества дано в учебнике химии.

Число молекул любого количества вещества массой m и молярной массой M согласно формулам (8.4) и (8.7) равно:

$$N = \nu N_A = N_A m / M. \tag{8.8}$$

Молекулярная и молярная массы. Количество вещества [Найти]

1. Какие измерения надо произвести, чтобы оценить размеры молекулы оливкового масла?
2. Если бы атом увеличился до размеров макового зёрнышка (0,1 мм), то размеров какого тела при том же увеличении достигло бы зёрнышко?
3. Перечислите известные вам доказательства существования молекул, не упомянутые в тексте.
4. Чему равна относительная молекулярная масса воды?
5. Заполните таблицу.

Основные формулы МКТ

Количество вещества (через число частиц)	
Количество вещества (через массу тела)	
Масса одной молекулы	
Концентрация молекул	

§ 54 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ»

При решении большей части задач нужно уметь определять молярные массы веществ. Для этого по известным из таблицы Менделеева относительным атомным массам надо определить относительную молекулярную массу, а затем и молярную массу по формуле $M = 10^{-3} M_r$ кг/моль, где M — молярная масса, M_r — относительная молекулярная масса. Во многих задачах требуется по известной массе m тела определить количество вещества ν или число молекул (атомов) N в нём. Для этого используют формулы $\nu = \frac{m}{M}$ и $N = \frac{m}{M} N_A$. Постоянную Авогадро N_A лучше запомнить. Массы отдельных молекул определяются по формуле $m_0 = \frac{M}{N_A}$. В некоторых задачах массу вещества нужно выразить через его плотность ρ и объём V.

Задача 1. Определите молярную массу воды и затем массу одной молекулы воды.

Р е ш е н и е. Относительная атомная масса водорода равна 1,00797, а кислорода равно 15,9994. Химическая формула воды — H_2O. Следовательно, относительная молекулярная масса воды равна:

$M_r = 2 \cdot 1{,}00797 + 15{,}9994 = 18{,}01534 \approx 18.$

Молярная масса воды

$M \approx 10^{-3} \cdot 18$ кг/моль $= 0{,}018$ кг/моль.

В любом веществе, взятом в количестве 1 моль, содержится N_A молекул, где N_A — число Авогадро; $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$. Тогда масса одной молекулы воды $m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{0{,}018 \text{ кг/моль}}{6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 3 \cdot 10^{-26}$ кг.

Задача 2. Определите количество вещества и число молекул, содержащихся в углекислом газе массой 1 кг.

Р е ш е н и е. Так как молярная масса углекислого газа $M = 0{,}044$ кг/моль, то количество вещества $\nu = \frac{m}{M} = \frac{1}{0{,}044} \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{кг}} \approx 23$ моль.

Число молекул $N = \frac{m}{M} N_A = 23 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \approx 1{,}4 \cdot 10^{25}$.

Задача 3. Из блюдца испаряется вода массой 50 г за 4 сут. Определите среднюю скорость испарения — число молекул воды, вылетающих из блюдца за 1 с.

Р е ш е н и е. Молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молярная масса воды $M = 0{,}018$ кг/моль.

Число молекул воды в блюдце $N = \frac{m}{M} N_A$. Средняя скорость испарения $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N}{t} = \frac{m}{M} N_A \frac{1}{t} = 4{,}8 \cdot 10^{18}$ с$^{-1}$.

Задача 4. Определите толщину серебряного покрытия пластинки площадью 1 см^2, если оно содержит серебро в количестве 0,02 моль. Плотность серебра равна $1{,}05 \cdot 10^4$ кг/м^3.

Решение. Объём слоя серебра, покрывающего пластинку, $V = Sd$. Масса серебряного покрытия равна $m = \rho S d = \nu M$. Молярная масса серебра $M = 0{,}108$ кг/моль.

Тогда $d = \dfrac{\nu M}{\rho S} = 2$ мм.

Задачи для самостоятельного решения

1. Какую площадь может занять капля оливкового масла объёмом 0,02 см^3 при расплывании её на поверхности воды?

2. Определите молярные массы водорода и гелия.

3. Во сколько раз число атомов в углероде массой 12 кг превышает число молекул в кислороде массой 16 кг?

4. Чему равно количество вещества (в молях), содержащегося в воде массой 1 г?

5. Молярная масса азота равна 0,028 кг/моль. Чему равна масса молекулы азота?

6. Определите число атомов в меди объёмом 1 м^3. Молярная масса меди $M = 0{,}0635$ кг/моль, её плотность $\rho = 9000$ кг/м^3.

7. Плотность алмаза 3500 кг/м^3. Какой объём займут 10^{22} атомов этого вещества?

8. Определите число атомных слоёв серебряного покрытия толщиной 15 мкм. Плотность серебра $1{,}05 \cdot 10^4$ кг/м^3.

С1. На поверхность воды капают раствор подсолнечного масла в бензине. Сначала на поверхности воды образуется круглое радужное пятно, затем бензин испаряется, пятно исчезает. Посыпание поверхности воды тальком через тонкое ситечко позволяет обнаружить границы невидимого до того масляного пятна диаметром 20 см. Оцените по этим данным размер молекулы масла, если концентрация масла в бензине 0,1 % (по объёму), а объём капли бензина 0,05 мл. Плотность бензина и масла примерно равны.

С2. Определите массу золотого слитка, содержащего то же количество атомов, что и железный брусок массой 0,5 кг. Молярные массы золота и железа определите по периодической таблице Менделеева.

С3. Определите объём золотого слитка, содержащего то же количество атомов, что и железный брусок объёмом 1 дм^3. Плотность золота $\rho_1 = 19{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3, плотность железа $\rho_2 = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3.

§ 55 БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Вспомните из курса физики основной школы явление диффузии. Чем может быть объяснено это явление?

Ранее вы узнали, что такое *диффузия,* т. е. проникновение молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого вещества. Это явление определяется беспорядочным движением молекул. Этим можно объяснить, например, тот факт, что объём смеси воды и спирта меньше объёма составляющих её компонентов.

Вырежите из бумаги кружочки разных диаметров и покажите, что площадь, которую занимают кружочки, расположенные вперемешку, меньше суммы площадей, занимаемых этими кружочками в отдельности.

Но самое очевидное доказательство движения молекул можно получить, наблюдая в микроскоп мельчайшие, взвешенные в воде частицы какого-либо твёрдого вещества. Эти частицы совершают беспорядочное движение, которое называют *броуновским.*

Запомни **Броуновское движение** — это тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частиц.

Наблюдение броуновского движения. Английский ботаник Р. Броун (1773—1858) впервые наблюдал это явление в 1827 г., рассматривая в микроскоп взвешенные в воде споры плауна.

Позже он рассматривал и другие мелкие частицы, в том числе частички камня из египетских пирамид. Сейчас для наблюдения броуновского движения используют частички краски гуммигут, которая нерастворима в воде. Эти частички совершают беспорядочное движение. Самым поразительным и непривычным для нас является то, что это движение никогда не прекращается. Мы ведь привыкли к тому, что любое движущееся тело рано или поздно останавливается. Броун вначале думал, что споры плауна проявляют признаки жизни.

Важно Броуновское движение — тепловое движение, и оно не может прекратиться. С увеличением температуры интенсивность его растёт.

На рисунке 8.3 приведены траектории движения броуновских частиц. Положения частиц, отмеченные точками, определены через равные промежутки времени — 30 с. Эти точки соединены прямыми линиями. В действительности траектория частиц гораздо сложнее.

Проведите эксперимент по определению скорости распространения запаха духов в вашем классе. Можно ли будет считать эту скорость скоростью движения молекул пахучего вещества?

Объяснение броуновского движения. Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории.

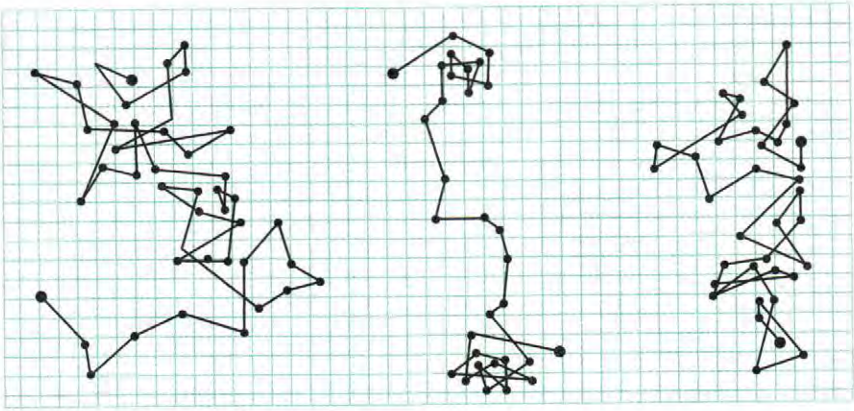


Рис. 8.3

Интересно

«Немногие явления способны так увлечь наблюдателя, как броуновское движение. Здесь наблюдателю позволяется заглянуть за кулисы того, что совершается в природе. Перед ним открывается новый мир — безостановочная сутолока огромного числа частиц. Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частицы, почти мгновенно меняя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные частицы, но и они постоянно меняют направление движения. Большие частицы практически толкутся на месте. Их выступы явно показывают вращение частиц вокруг своей оси, которая постоянно меняет направление в пространстве. Нигде нет и следа системы или порядка. Господство слепого случая — вот какое сильное, подавляющее впечатление производит эта картина на наблюдателя». Р. Поль (1884—1976).

Важно Причина броуновского движения частицы заключается в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.

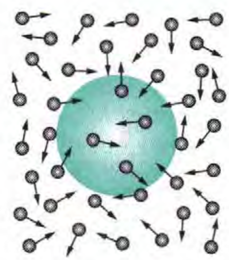


Рис. 8.4

На рисунке 8.4 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул. При беспорядочном движении молекул передаваемые ими броуновской частице импульсы, например слева и справа, неодинаковы. Поэтому отлична от нуля результирующая сила давления молекул жидкости на броуновскую частицу. Эта сила и вызывает изменение движения частицы.

Интересно

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана в 1905 г. А. Эйнштейном (1879—1955). Построение теории броуновского движения и её экспериментальное подтверждение французским физиком Ж. Перреном окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории. В 1926 г. Ж. Перрен получил Нобелевскую премию за исследование структуры вещества.

Опыты Перрена. Идея опытов Перрена состоит в следующем.

Известно, что концентрация молекул газа в атмосфере уменьшается с высотой. Если бы не было теплового движения, то все молекулы упали бы на Землю и атмосфера исчезла бы. Однако если бы не было притяжения к Земле, то за счёт теплового движения молекулы покидали бы Землю, так как газ способен к неограниченному расширению. В результате действия этих противоположных факторов устанавливается определённое распределение молекул по высоте, т. е. концентрация молекул довольно быстро уменьшается с высотой. Причём чем больше масса молекул, тем быстрее с высотой убывает их концентрация.

Броуновские частицы участвуют в тепловом движении. Так как их взаимодействие пренебрежимо мало, то совокупность этих частиц в газе или жидкости можно рассматривать как идеальный газ из очень тяжёлых молекул. Следовательно, концентрация броуновских частиц в газе или жидкости в поле тяжести Земли должна убывать по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Закон этот известен.

Перрен с помощью микроскопа большого увеличения и малой глубины поля зрения (малой глубины резкости) наблюдал броуновские частицы в очень тонких слоях жидкости. Подсчитывая концентрацию частиц на разных высотах, он нашёл, что эта концентрация убывает с высотой по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Отличие в том, что за счёт большой массы броуновских частиц убывание происходит очень быстро.

Все эти факты свидетельствуют о правильности теории броуновского движения и о том, что броуновские частицы участвуют в тепловом движении молекул.

Интересно Подсчёт броуновских частиц на разных высотах позволил Перрену определить постоянную Авогадро совершенно новым методом. Значение этой постоянной совпало с ранее известным.

Броуновское движение. Опыты Перрена Найти

1. Чем определяется скорость распространения ароматических веществ в воздухе?
2. Что является причиной броуновского движения частиц?
3. Можно ли сказать, что движение броуновской частицы — это тепловое движение, аналогичное движению молекул?

ЕГЭ

A1. Учительница вошла в класс. Ученик, сидящий на последней парте, почувствовал запах её духов через 10 с. Скорость распространения запаха духов в комнате определяется в основном скоростью

1) испарения
2) диффузии
3) броуновского движения
4) конвекционного переноса воздуха

A2. Явление диффузии в жидкостях свидетельствует о том, что молекулы жидкостей

1) движутся хаотично
2) притягиваются друг к другу
3) состоят из атомов
4) колеблются около своих положений равновесия

§ 56 СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ. СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Подумайте, можно ли объяснить свойства вещества во всех его агрегатных состояниях строением вещества, движением и взаимодействием его частиц.

Силы взаимодействия молекул. Молекулы взаимодействуют друг с другом. Без этого взаимодействия не было бы ни твёрдых, ни жидких тел.

Доказать существование значительных сил взаимодействия между атомами или молекулами несложно. Попробуйте-ка сломать толстую палку! А ведь она состоит из молекул. Но одни *силы притяжения* не могут обеспечить существования устойчивых образований из атомов и молекул. На очень малых расстояниях между молекулами обязательно действуют *силы отталкивания*. Благодаря этому молекулы не проникают друг в друга и куски вещества никогда не сжимаются до размеров порядка размеров одной молекулы.

Запомни **Молекула** — это сложная система, состоящая из отдельных заряженных частиц: электронов и атомных ядер.

Важно В целом молекулы электрически нейтральны, тем не менее между ними на малых расстояниях действуют значительные электрические силы: происходит взаимодействие электронов и атомных ядер соседних молекул.

Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия практически не сказываются.

На расстояниях, превышающих 2—3 диаметра молекул, действуют силы притяжения. По мере уменьшения расстояния между молекулами сила их взаимного притяжения сначала увеличивается, но одновременно увеличивается и сила отталкивания. При определённом расстоянии r_0 сила притяжения становится равной силе отталкивания. Это расстояние считается равным диаметру молекулы.

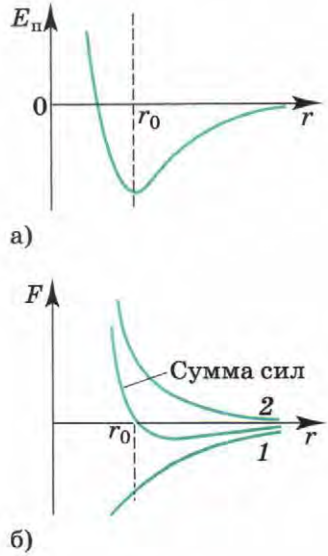


Рис. 8.5

При дальнейшем уменьшении расстояния электронные оболочки атомов начинают перекрываться и быстро увеличивается сила отталкивания. На рисунке 8.5 показаны графики зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул (рис. 8.5, *а*) и сил притяжения (*1*) и отталкивания (*2*) (рис. 8.5, *б*) от расстояния между молекулами. При $r = r_0$ потенциальная энергия минимальна, сила притяжения равна силе отталкивания. При $r > r_0$ сила притяжения больше силы отталкивания; при $r < r_0$ сила притяжения меньше силы отталкивания.

Молекулярно-кинетическая теория даёт возможность понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

Создайте механическую модель взаимодействия молекул. Возьмите два шарика и прикрепите их к концам пружины. Изменяйте расстояние между шариками и понаблюдайте за изменением силы взаимодействия. Сделайте выводы.

Итак, между молекулами действуют силы притяжения и они участвуют в тепловом движении. Агрегатное состояние вещества определяется тем, какое из этих двух свойств молекул является главным.

Газы. В газах расстояние между атомами или молекулами в среднем во много раз больше размеров самих молекул. Например, при атмосферном давлении объём сосуда в десятки тысяч раз превышает объём находящихся в нём молекул.

Газы легко сжимаются, при этом уменьшается среднее расстояние между молекулами, но форма молекулы не изменяется.

Важно Газы могут неограниченно расширяться. Они не сохраняют ни формы, ни объёма. Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Молекулы газа с огромными скоростями — сотни метров в секунду — движутся в пространстве. Сталкиваясь, они отскакивают друг от друга в разные стороны подобно бильярдным шарам. Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их друг возле друга.

В газах средняя кинетическая энергия теплового движения молекул больше средней потенциальной энергии их взаимодействия, поэтому часто потенциальной энергией взаимодействия молекул мы можем пренебречь.

Жидкости. Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу, поэтому молекула жидкости ведёт себя иначе, чем молекула газа.

В жидкостях существует так называемый *ближний порядок*, т. е. упорядоченное расположение молекул сохраняется на расстояниях, равных нескольким молекулярным диаметрам.

Молекула колеблется около своего положения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами. Лишь время от времени она совершает очередной «прыжок», попадая в новое положение равновесия.

В положении равновесия сила отталкивания равна силе притяжения, т. е. суммарная сила взаимодействия молекулы равна нулю.

Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я. И. Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей. По образному выражению учёного: «...молекулы жидкости ведут кочевой образ жизни...» При этом время *оседлой жизни* молекулы воды, т. е. время её колебаний около одного определённого положения равновесия при комнатной температуре, равно в среднем 10^{-11} с. Время же одного колебания значительно меньше (10^{-12}—10^{-13} с). С повышением температуры время оседлой жизни молекул уменьшается.

Я. И. Френкель (1894—1952)

Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга. При уменьшении объёма силы отталкивания становятся очень велики. Этим и объясняется *малая сжимаемость жидкостей*.

Важно Жидкости: 1) малосжимаемы; 2) текучи, т. е. не сохраняют своей формы.

Объяснить текучесть жидкостей можно так. Внешняя сила заметно не меняет числа перескоков молекул в секунду. Но перескоки молекул из одного оседлого положения в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы. Вот почему жидкость течёт и принимает форму сосуда.

В жидкостях средняя кинетическая энергия теплового движения молекул сравнима со средней потенциальной энергией их взаимодействия. Наличие поверхностного натяжения доказывает, что силы взаимодействия молекул жидкостей существенны, и ими пренебрегать нельзя.

Твёрдые тела. Атомы или молекулы твёрдых тел, в отличие от атомов и молекул жидкостей, колеблются около определённых положений равновесия. По этой причине

Важно твёрдые тела сохраняют не только объём, но и форму.

В твёрдых телах средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул много больше средней кинетической энергии их теплового движения.

Запомни Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твёрдого тела, то получится правильная пространственная решётка, называемая **кристаллической**.

На рисунках 8.6 и 8.7 изображены кристаллические решётки поваренной соли и алмаза. Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов приводит к правильным внешним геометрическим формам.

Рис. 8.6

Рис. 8.7

Строение газообразных, жидких и твёрдых тел — Найти

1. Почему два свинцовых бруска с гладкими чистыми срезами слипаются, если их прижать друг к другу, а кусочки мела не слипаются?
2. Газ способен к неограниченному расширению. Почему существует атмосфера у Земли?
3. Чем различаются траектории движения молекул газа, жидкости и твёрдого тела? Нарисуйте примерные траектории молекул веществ, находящихся в этих состояниях.

Повторите материал главы 8 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

ГЛАВА 9 МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

§ 57 ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Вспомните, что такое физическая модель.
Приведите примеры физических моделей.
Можно ли определить скорость одной молекулы?

Идеальный газ. У газа при обычных давлениях расстояние между молекулами во много раз превышает их размеры. В этом случае силы взаимодействия молекул пренебрежимо малы и кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии взаимодействия. Молекулы газа можно рассматривать как материальные точки или очень маленькие твёрдые шарики. Вместо *реального газа*, между молекулами которого действуют силы взаимодействия, мы будем рассматривать его *модель — идеальный газ.*

Запомни **Идеальный газ** — это теоретическая модель газа, в которой не учитываются размеры молекул (они считаются материальными точками) и их взаимодействие между собой (за исключением случаев непосредственного столкновения).

Естественно, при столкновении молекул идеального газа на них действует сила отталкивания. Так как молекулы газа мы можем согласно модели считать материальными точками, то размерами молекул мы пренебрегаем, считая, что объём, который они занимают, гораздо меньше объёма сосуда.

Важно Напомним, что в физической модели принимают во внимание лишь те свойства реальной системы, учёт которых совершенно необходим для объяснения исследуемых закономерностей поведения этой системы.

Ни одна модель не может передать все свойства системы. Сейчас нам предстоит решить задачу: вычислить с помощью молекулярно-кинетической теории давление идеального газа на стенки сосуда. Для этой задачи модель идеального газа оказывается вполне удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа p_0. Как возникает это давление?

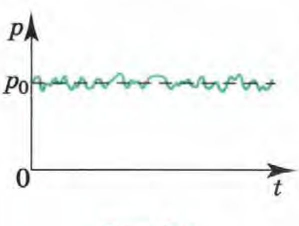


Рис. 9.1

Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на неё с некоторой силой. В результате беспорядочных ударов о стенку давление быстро меняется со временем примерно так, как показано на рисунке 9.1. Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента — мембраны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления p_0 практически оказывается вполне определённой величиной, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

Среднее давление имеет определённое значение как в газе, так и в жидкости. Но всегда происходят незначительные случайные отклонения от этого среднего значения. Чем меньше площадь поверхности тела, тем заметнее относительные изменения силы давления, действующей на данную площадь. Так, например, если участок поверхности тела имеет размер порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на неё сила давления меняется скачкообразно от нуля до некоторого значения при попадании молекулы на этот участок.

Среднее значение квадрата скорости молекул. Для вычисления среднего давления надо знать значение средней скорости молекул (точнее, среднее значение квадрата скорости). Это не простой вопрос. Вы привыкли к тому, что скорость имеет каждая частица. Средняя же скорость молекул зависит от того, каковы скорости движения всех молекул.

Чем отличается определение средней скорости тела в механике от определения средней скорости молекул газа?

С самого начала нужно отказаться от попыток проследить за движением всех молекул, из которых состоит газ. Их слишком много, и движутся они очень сложно. Нам и не нужно знать, как движется каждая молекула. Мы должны выяснить, к какому результату приводит движение всех молекул газа.

Характер движения всей совокупности молекул газа известен из опыта. Молекулы участвуют в беспорядочном (тепловом) движении. Это означает, что скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень малой. Направление движения молекул беспрестанно меняется при их столкновениях друг с другом.

Скорости отдельных молекул могут быть любыми, однако *среднее* значение модуля этих скоростей вполне определённое.

В дальнейшем нам понадобится среднее значение не самой скорости, а квадрата скорости — средняя квадратичная скорость. От этой величины зависит средняя кинетическая энергия молекул. А средняя кинетическая энергия молекул, как мы вскоре убедимся, имеет очень большое значение во всей молекулярно-кинетической теории. Обозначим модули скоростей отдельных молекул газа через v_1, v_2, v_3, ... , v_N. Среднее значение квадрата скорости определяется следующей формулой:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \ldots + v_N^2}{N}, \qquad (9.1)$$

где N — число молекул в газе.

Но квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат OX, OY, OZ.

Из курса механики известно, что при движении на плоскости $v^2 = v_x^2 + v_y^2$. В случае, когда тело движется в пространстве, квадрат скорости равен:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \qquad (9.2)$$

Проведите числовой эксперимент. Пусть скорости молекул некоторого газа распределены так, как показано в таблице.

Число молекул	10	10	10	5
Скорость, м/с	10	20	40	50

Определите среднее значение модуля скорости и среднее значение квадрата скорости молекул этого газа. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Средние значения величин v_x^2, v_y^2 и v_z^2 можно определить с помощью формул, подобных формуле (9.1). Между средним значением $\overline{v^2}$ и средними значениями квадратов проекций существует такое же соотношение, как соотношение (9.2):

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \tag{9.3}$$

Действительно, для каждой молекулы справедливо равенство (9.2). Сложив такие равенства для отдельных молекул и разделив обе части полученного уравнения на число молекул N, мы придём к формуле (9.3).

Важно Внимание! Так как направления трёх осей OX, OY и OZ вследствие беспорядочного движения молекул равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \tag{9.4}$$

Учитывая соотношение (9.4), подставим в формулу (9.3) $\overline{v_x^2}$ вместо $\overline{v_y^2}$ и $\overline{v_z^2}$. Тогда для среднего квадрата проекции скорости на ось OX получим

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}, \tag{9.5}$$

т. е. средний квадрат проекции скорости равен $\frac{1}{3}$ среднего квадрата самой скорости. Множитель $\frac{1}{3}$ появляется вследствие трёхмерности пространства и соответственно существования трёх проекций у любого вектора.

Важно Скорости молекул беспорядочно меняются, но *средний квадрат скорости* вполне определённая величина.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) газов. Строгий вывод уравнения молекулярно-кинетической теории газов довольно сложен. Поэтому мы ограничимся упрощённым выводом уравнения.

Предположим, что газ идеальный и взаимодействие молекул со стенкой абсолютно упругое.

Вычислим давление газа, находящегося в сосуде, на боковую стенку площадью S, перпендикулярную координатной оси OX (рис. 9.2).

Интересно Уравнение молекулярно-кинетической теории — первое количественное соотношение, полученное в МКТ, поэтому оно называется основным. После вывода этого уравнения в XIX в. и экспериментального доказательства его справедливости началось быстрое развитие количественной теории, продолжающееся по сегодняшний день.

При ударе молекулы о стенку её импульс изменяется: $\Delta p_x = m_0(v_x - v_{0x})$. При абсолютно упругом взаимодействии модули скорости молекулы до и после удара равны, и тогда изменение импульса $\Delta p_x = 2m_0v_x$. Согласно второму закону Ньютона изменение импульса молекулы равно импульсу подействовавшей на неё силы со стороны стенки сосуда, а согласно третьему закону Ньютона импульс силы, с которой молекула подействовала на стенку, будет иметь то же значение. Следовательно, в результате удара молекулы на стенку подействовала сила, импульс которой равен $2m_0|v_x|$.

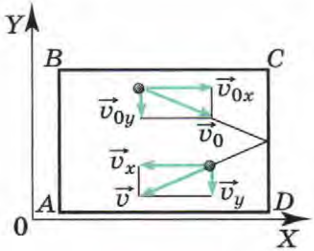


Рис. 9.2

Молекул много, и каждая из них передаёт стенке при столкновении такой же импульс. За время t они передадут стенке импульс $2m_0|v_x|Z$, где Z — число ударов всех молекул о стенку за это время. Число Z, очевидно, прямо пропорционально концентрации молекул, т. е. числу молекул в единице объёма, а также скорости молекул $|v_x|$. Чем больше эта скорость, тем больше молекул за время t успеют столкнуться со стенкой. Если бы молекулы «стояли на месте», то столкновений их со стенкой не было бы совсем. Кроме того, число столкновений молекул со стенкой пропорционально площади S поверхности стенки: $Z \sim n|v_x|St$. Надо ещё учесть, что в среднем только половина всех молекул движется к стенке. Благодаря хаотичному движению направления движения молекул по и против оси OX равновероятны, поэтому вторая половина молекул движется в обратную сторону. Значит, число ударов молекул о стенку за время t $Z = \frac{1}{2}n|v_x|St$ и полный импульс силы, подействовавшей на стенку, $Ft = 2m_0|v_x|Zt$. Отсюда $F = nm_0v_x^2S$.

Учтём, что не все молекулы имеют одно и то же значение квадрата скорости v_x^2. В действительности средняя сила, действующая на стенку, пропорциональна не v_x^2, а среднему значению квадрата скорости $\overline{v_x^2}$: $\overline{F} = nm_0\overline{v_x^2}S$.

Так как согласно формуле (9.5) $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$, то $\overline{F} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}S$. Таким образом, давление газа на стенку сосуда равно:

$$\boxed{p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}.} \qquad (9.6)$$

Важно Уравнение (9.6) и есть основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

Формула (9.6) связывает макроскопическую величину — давление, которое может быть измерено манометром, — с *микроскопическими* параметрами, характеризующими молекулы: их массой, концентрацией, скоростью хаотичного движения.

Связь давления со средней кинетической энергией молекул. Если через $\overline{E}$ обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы $\overline{E} = \frac{m_0\overline{v^2}}{2}$, то уравнение (9.6) можно записать в виде

$$\boxed{p = \frac{2}{3}n\overline{E}.} \qquad (9.7)$$

Важно Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Основное уравнение МКТ. Средний квадрат скорости Найти

1. Чем пренебрегают, когда реальный газ рассматривают как идеальный?
2. Газ оказывает давление на стенки сосуда. А давит ли один слой газа на другой?
3. Всегда ли равноправны средние значения проекций скорости движения молекул?
4. Чему равно среднее значение проекции скорости молекул на ось OX?
5. Почему молекула при соударении со стенкой действует на неё с силой, пропорциональной скорости, а давление пропорционально квадрату скорости молекулы?
6. Почему и как в основном уравнении молекулярно-кинетической теории появляется множитель $\frac{1}{3}$?
7. Как средняя кинетическая энергия молекул связана с концентрацией газа и его давлением на стенки сосуда?

А1. Давление 100 кПа создаётся молекулами газа массой $m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$ кг при концентрации $n = 10^{25}$ м$^{-3}$. Чему равен средний квадрат скорости молекул?

1) 1 (мм/с)^2 2) 100 (м/с)^2 3) 3000 (м/с)^2 4) 1 000 000 (м/с)^2

А2. При неизменной концентрации молекул идеального газа в результате охлаждения давление газа уменьшилось в 4 раза. Средний квадрат скорости теплового движения молекул газа при этом

1) уменьшился в 16 раз
2) уменьшился в 2 раза
3) уменьшился в 4 раза
4) не изменился

А3. При неизменной концентрации частиц идеального газа средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул увеличилась в 3 раза. При этом давление газа

1) уменьшилось в 3 раза
2) увеличилось в 3 раза
3) увеличилось в 9 раз
4) не изменилось

А4. Давление газа при нагревании в закрытом сосуде увеличивается. Это можно объяснить увеличением

1) концентрации молекул
2) расстояния между молекулами
3) средней кинетической энергии молекул
4) средней потенциальной энергии молекул

§ 58 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ»

Обратим внимание на то, что в задачах, как правило, имеется в виду средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул. Связь этой скорости с макропараметрами, такими, как давление и температура, и устанавливает основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Именно поступательное движение молекул определяет их удары о стенку и силу, действующую на неё.

Задача 1. Плотность газа в баллоне электрической лампы $\rho = 0{,}9$ кг/м^3. При горении лампы давление в ней возросло с $p_1 = 8 \cdot 10^4$ Па до $p_2 = 1{,}1 \cdot 10^5$ Па. На сколько увеличилось при этом значение среднего квадрата скорости молекул газа?

Решение. Произведение массы m_0 одной молекулы на концентрацию молекул (число молекул в единице объёма) равно массе молекул, заключённых в единице объёма, т. е. плотности газа $\rho = m_0 n$. Следовательно, основное уравнение молекулярно-кинетической теории (9.6) можно записать в виде $p = \frac{1}{3}\rho\overline{v^2}$.

Поэтому $\overline{v_2^2} - \overline{v_1^2} = \frac{3}{\rho}(p_2 - p_1) = 10^5$ (м/с)^2.

Задача 2. Определите плотность кислорода ρ_O при давлении $2 \cdot 10^5$ Па, если средний квадрат скорости его молекул равен 10^6 (м/с)^2.

Решение. Давление кислорода $p = nm_O\overline{v^2}/3$, где n — концентрация молекул. Очевидно, что $\rho = m_O n$, где m_O — масса молекулы кислорода.

Окончательно имеем $p = \rho_O\overline{v^2}/3$, или $\rho_O = \frac{3p}{\overline{v^2}} = 0{,}6$ кг/м^3.

Задача 3. Два одинаковых сосуда, содержащие одинаковое число молекул азота, соединены краном. В первом сосуде средний квадрат скорости молекул $\overline{v_1^2} = 1{,}6 \cdot 10^5$ (м/с)^2, во втором сосуде — $\overline{v_2^2} = 2{,}5 \cdot 10^5$ (м/с)^2. Кран открывают. Чему будет равен средний квадрат скорости молекул после того, как установится равновесие?

Решение. Разные скорости молекул в сосудах объясняются разными температурами азота в них. Так как по условию задачи число молекул, имеющих скорость v_1, равно числу молекул, имеющих скорость v_2 ($N_1 = N_2$), то квадрат средней скорости

$$\overline{v^2} = \frac{N_1\overline{v_1^2} + N_2\overline{v_2^2}}{N_1 + N_2} = \frac{\overline{v_1^2} + \overline{v_2^2}}{2} = 2{,}05 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}^2.$$

Задача 4. С какой скоростью растёт толщина покрытия стенки серебром при напылении, если атомы серебра, обладая энергией $\overline{E} = 10^{-17}$ Дж, производят на стенку давление $p = 0{,}1$ Па? Атомная масса серебра $A = 1{,}108$ г/моль, его плотность $\rho = 10{,}5$ г/см^3.

Решение. Если за время Δt толщина слоя серебра стала равной Δl, то скорость роста толщины покрытия есть $\Delta l/\Delta t$. Объём напылённого слоя $\Delta V = S\Delta l$, где S – площадь поверхности стенки. Этот объём можно выразить иначе:

$$\Delta V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_0 N}{\rho},$$

где m — масса серебряного покрытия, напылённого за время Δt, m_0 — масса атома, N — число атомов. Определим суммарную массу атомов серебра, осевших на стенку.

Изменение импульса атома, осевшего на стенку со скоростью v, равно импульсу силы, подействовавшей на стенку со стороны атома:

$$f\tau = m_0\Delta v = m_0(0 - v) = -m_0 v.$$

На стенку подействует импульс силы $f_{\text{ст}}\tau = +m_0 v$. Если на стенку за время Δt осядет N атомов, то импульс силы, подействовавший на стенку в результате ударов о неё N атомов, будет $F\Delta t = Nvm_0$.

Давление на стенку $p = F/S$, или

$$p = Nvm_0/S\Delta t. \quad (1)$$

Средняя кинетическая энергия атома $\overline{E} = m_0 v^2/2$, отсюда скорость атома $v = \sqrt{2\overline{E}/m_0}$.

Подставив выражение для скорости в формулу (1), получим $p = N\sqrt{2\overline{E}m_0}\,/S\Delta t$.

Отсюда имеем $N = pS\Delta t\,/\sqrt{2m_0\overline{E}}$, $\quad \Delta l = \dfrac{\Delta V}{S} = \dfrac{m_0 N}{\rho S} = \dfrac{m_0 p\Delta t S}{\rho S\sqrt{2m_0\overline{E}}} = \dfrac{m_0 p \Delta t}{\rho\sqrt{2m_0\overline{E}}}$, тогда

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{p\sqrt{m_0}}{\rho\sqrt{2\overline{E}}}. \quad (2)$$

Масса атома серебра $m_0 = A/N_{\text{A}}$, где $N_{\text{A}} = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Подставив это выражение в формулу (2), получим

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{p}{\rho}\sqrt{\frac{A}{N_{\text{A}} \cdot 2\overline{E}}} \approx 9 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Температура воздуха в комнате изменилась от 7 до 27 °С. На сколько процентов уменьшилось число молекул в комнате?

2. Под каким давлением находится газ в сосуде, если средний квадрат скорости его молекул $\overline{v^2} = 10^6$ (м/с)^2, концентрация молекул $n = 3 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$, масса каждой молекулы $m_0 = 5 \cdot 10^{-26}$ кг?

3. В колбе объёмом 1,2 л содержится $3 \cdot 10^{22}$ атомов гелия. Чему равна средняя кинетическая энергия каждого атома? Давление газа в колбе 10^5 Па.

4. Вычислите средний квадрат скорости движения молекул газа, если его масса $m = 6$ кг, объём $V = 4{,}9$ м^3 и давление $p = 200$ кПа.

§ 59 ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

Что измеряют термометры?
Что означают слова: «Я измерил температуру тела»?
Что именно характеризует температура?

Макроскопические параметры. Состояние макроскопических тел, в частности газов, и процессы изменения их состояний можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, из которых состоят тела, а ко всем молекулам в целом. К числу таких величин относятся объём V, давление p, температура t.

Так, газ данной массы, находящийся в сосуде, всегда занимает объём этого сосуда и имеет определённые давление и температуру. Объём и давление представляют собой механические величины, которые помогают описывать состояние газа. Температура в механике не рассматривается, так как она характеризует внутреннее состояние тела.

Запомни Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учёта их молекулярного строения (V, p, t), называют **макроскопическими параметрами.**

Однако макроскопические параметры не исчерпываются объёмом, давлением и температурой.

Например, для описания состояния смеси газов нужно ещё знать концентрации отдельных компонентов или их массы. Обычный атмосферный воздух представляет собой смесь газов.

Холодные и горячие тела. Центральное место во всём учении о тепловых явлениях занимает понятие *температура.* Все мы хорошо знаем различие между холодными и горячими телами. На ощупь мы определяем, какое тело нагрето сильнее, и говорим, что это тело имеет более высокую температуру. Таким образом,

Важно температура характеризует степень нагретости тела (холодное, тёплое, горячее).

Для её измерения был создан прибор, называемый *термометром.* Его устройство основано на свойстве тел изменять объём при нагревании или охлаждении.

Тепловое равновесие. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он соприкоснулся с ним. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра стали равны и между телами установилось *тепловое равновесие,* при котором температура перестаёт изменяться.

Тепловое равновесие с течением времени устанавливается между любыми телами, имеющими различную температуру.

Бросьте в стакан с водой кусочек льда и закройте стакан плотной крышкой. Лёд начнёт плавиться, а вода охлаждаться. Когда лёд растает, вода начнёт нагреваться. Измерьте несколько раз температуру воздуха и температуру воды в стакане. Когда закончится изменение состояния воды в стакане?

Обсудите с одноклассником следующий вопрос: «Зачем в данном опыте нужно закрывать стакан крышкой?»

Из простых наблюдений можно сделать вывод о существовании очень важного общего свойства тепловых явлений.

Важно Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.

Запомни **Тепловым равновесием** называют такое состояние тел, при котором температура во всех точках системы одинакова.

Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Температура. Система макроскопических тел может находиться в различных состояниях. В каждом из этих состояний температура имеет своё строго определённое значение. Другие физические величины в состоянии теплового равновесия системы могут иметь разные значения, которые с течением времени не меняются. Так, например, объёмы различных частей системы и давления внутри их при наличии твёрдых перегородок могут быть разными. Если вы внесёте с улицы мяч, наполненный сжатым воздухом, то спустя некоторое время температура воздуха в мяче и температура в комнате выравняются. Давление же воздуха в мяче всё равно будет больше, чем в комнате.

Важно Температура характеризует состояние теплового равновесия системы тел: все тела системы, находящиеся друг с другом в тепловом равновесии, имеют одну и ту же температуру.

При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмена. Если же температуры тел различны, то при установлении между ними теплового контакта будет происходить обмен энергией. При этом опыт учит, что тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой. Разность температур тел указывает направление теплообмена между ними — от более нагретого тела к менее нагретому.

Измерение температуры. Термометры. Для измерения температуры можно воспользоваться изменением любой макроскопической величины в зависимости от температуры: объёма, давления, электрического сопротивления и т. д.

Чаще всего на практике используют зависимость объёма жидкости (ртути или спирта) от температуры. При градуировке термометра обычно за начало отсчёта (0) принимают температуру тающего льда; второй постоянной точкой (100) считают температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении (шкала Цельсия). Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами (рис. 9.3). Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на 1 °С.

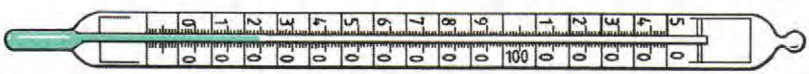


Рис. 9.3

Интересно

В 1742 г. А. Цельсий опубликовал работу с описанием стоградусной шкалы термометра, в которой температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении была принята за 0°, а температура таяния льда — за 100°. Позже шведский биолог К. Линней «перевернул» эту шкалу, приняв за 0° температуру таяния льда. Этой шкалой мы пользуемся до сих пор, называя её шкалой Цельсия.

Так как различные жидкости расширяются при нагревании неодинаково, то установленная таким образом шкала будет зависеть от свойств данной жидкости и расстояния на шкале между 0 и 100 °С будут различны. Поэтому градусы (расстояние между двумя соседними отметками) спиртового и ртутного термометров будут разными.

Наполните частично узкий сосуд подсолнечным маслом и отметьте верхний уровень масла. Измерьте термометром температуру воздуха. Затем поместите сосуд в горячую воду и снова отметьте верхний уровень масла. Измерьте температуру воды тем же термометром. Затем наполните этот же сосуд другой жидкостью и проведите аналогичные измерения. Сравните расстояния между отметками на сосуде в двух опытах. Сделайте вывод.

Какое же вещество выбрать для того, чтобы избавиться от этой зависимости?

Важно Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы — водород, гелий, кислород — расширяются при нагревании одинаково и одинаково меняют своё давление при изменении температуры.

По этой причине в физике для установления рациональной температурной шкалы используют изменение давления определённого количества разреженного газа при постоянном объёме или изменение объёма газа при постоянном давлении. Такую шкалу иногда называют *идеальной газовой шкалой температур*.

Интересно

При установлении идеальной газовой шкалы температур удаётся избавиться ещё от одного существенного недостатка шкалы Цельсия — произвольности выбора начала отсчёта, т. е. нулевой температуры.

Далее мы подробно рассмотрим, как можно использовать газы для определения температуры.

Макроскопические параметры. Тепловое равновесие Найти

1. Какие величины характеризуют состояния макроскопических тел?
2. Каковы отличительные признаки состояний теплового равновесия?
3. Наблюдали ли вы примеры установления теплового равновесия тел, окружающих вас в повседневной жизни?
4. В чём преимущество использования разреженных газов для измерения температуры?
5. Как зависит интенсивность теплообмена между двумя телами от разности их температур?

§ 60 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ. ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

Какие макропараметры используют для описания состояния газа? Справедливо ли утверждение: «Чем быстрее движутся молекулы газа, тем выше его температура»?

Средняя кинетическая энергия молекул газа при тепловом равновесии. Возьмём сосуд, разделённый пополам перегородкой, проводящей тепло. В одну половину сосуда поместим кислород, а в другую — водород, имеющие разную температуру. Спустя некоторое время газы будут иметь одинаковую температуру, не зависящую от рода газа, т. е. будут находиться в состоянии теплового равновесия. Для определения температуры выясним, какая физическая величина в молекулярно-кинетической теории обладает таким же свойством.

Из курса физики основной школы известно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура тела. При нагревании газа в замкнутом сосуде давление газа возрастает. Согласно же основному уравнению молекулярно-кинетической теории (9.7) давление газа p прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул: $p = \frac{2}{3}n\overline{E}$.

Так как концентрация молекул газа $n = \frac{N}{V}$, то из уравнения (9.7) получаем $p = \frac{2N}{3V}\overline{E}$, или $p\frac{V}{N} = \frac{2}{3}\overline{E}$, или, согласно формуле (8.8), $\frac{pMV}{mN_A} = \frac{2}{3}\overline{E}$.

При тепловом равновесии, если давление и объём газа массой m постоянны и известны, то средняя кинетическая энергия молекул газа должна иметь строго определённое значение, как и температура.

Можно предположить, что

Важно при тепловом равновесии именно средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы.

Конечно, это пока только предположение. Его нужно экспериментально проверить. Практически такую проверку произвести непосредственно невозможно, так как измерить среднюю кинетическую энергию молекул очень трудно. Но с помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории её можно выразить через макроскопические параметры:

$$\overline{E} = \frac{3}{2}\frac{pV}{N} = \frac{3}{2}\frac{pMV}{mN_A}. \qquad (9.8)$$

Если кинетическая энергия действительно одинакова для всех газов в состоянии теплового равновесия, то и значение давления p должно быть тоже одинаково для всех газов при $\frac{V}{N} = \text{const}$. Только опыт может подтвердить или опровергнуть данное предположение.

Газы в состоянии теплового равновесия. Рассмотрим следующий опыт. Возьмём несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определённые объёмы и

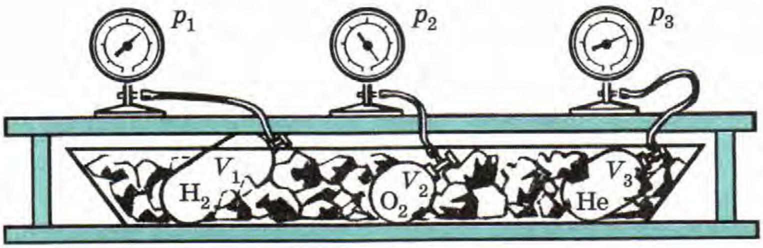


Рис. 9.4

снабжены манометрами. Это позволяет измерить давление в каждом сосуде. Массы газов известны, тем самым известно число молекул в каждом сосуде.

Приведём газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим их в тающий лёд и подождём, пока не установится тепловое равновесие и давление газов перестанет меняться (рис. 9.4). После этого можно утверждать, что все газы имеют одинаковую температуру 0 °С. Давления газов p, их объёмы V и число молекул N различны. Найдём отношение $\frac{pV}{N}$ для водорода. Если, к примеру, водород, количество вещества которого равно 1 моль, занимает объём $V_{H_2} = 0{,}1$ м^3, то при температуре 0 °С давление оказывается равным $p_{H_2} = 2{,}265 \cdot 10^4$ Па. Отсюда

$$\frac{p_{H_2}V_{H_2}}{N_A} = \frac{2{,}265 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3}{6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ м}^2} = 3{,}76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}. \quad (9.9)$$

Если взять водород в объёме, равном kV_{H_2}, то и число молекул будет равно kN_A и отношение $\frac{p_{H_2}kV_{H_2}}{kN_A}$ останется равным $3{,}76 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Такое же значение отношения произведения давления газа на его объём к числу молекул получается и для всех других газов при температуре тающего льда. Обозначим это отношение через Θ_0. Тогда

$$\frac{p_{H_2}V_{H_2}}{N_A} = \frac{p_{He}V_{He}}{N_{He}} = \frac{p_{O_2}V_{O_2}}{N_{O_2}} = \Theta_0. \quad (9.10)$$

Таким образом, наше предположение оказалось верным.

Важно

Средняя кинетическая энергия $\overline{E}$, а также давление p в состоянии теплового равновесия одинаковы для всех газов, если их объёмы и количества вещества одинаковы или если отношение $\frac{pV}{N} = \text{const}$.

Интересно

Соотношение (9.10) не является абсолютно точным. При давлениях в сотни атмосфер, когда газы становятся весьма плотными, отношение $\frac{pV}{N}$ перестаёт быть строго определённым, не зависящим от занимаемых газами объёмов. Оно выполняется для газов, когда их можно считать идеальными.

Если же сосуды с газами поместить в кипящую воду при нормальном атмосферном давлении, то согласно эксперименту отношение $\frac{pV}{N}$ по-прежнему будет одним и тем же для всех газов, но больше, чем предыдущее:

$$\frac{pV}{N} = \Theta_{100} = 5{,}14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}. \qquad (9.11)$$

Определение температуры. Можно, следовательно, утверждать, что величина Θ растёт с повышением температуры. Более того, Θ ни от чего, кроме температуры, не зависит. Ведь для идеальных газов Θ не зависит ни от рода газа, ни от его объёма или давления, а также от числа частиц в сосуде. Этот опытный факт позволяет рассматривать величину Θ как естественную меру температуры, как параметр газа, определяемый через другие макроскопические параметры газа. В принципе можно было бы считать температурой и саму величину Θ и измерять температуру в энергетических единицах — джоулях. Однако, во-первых, это неудобно для практического использования (температуре 100 °C соответствовало бы очень малое значение — порядка 10^{-21} Дж), а во-вторых, и это главное, уже давно

Важно температуру принято выражать в градусах.

Абсолютная температура.

Вместо температуры Θ, выражаемой в энергетических единицах, введём температуру, выражаемую в привычных для нас градусах.

Будем считать величину Θ прямо пропорциональной температуре T, измеряемой в градусах:

$$\Theta = kT, \qquad (9.12)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Запомни Определяемая равенством (9.12) температура называется **абсолютной**.

Такое название, как мы сейчас увидим, имеет достаточные основания.

Учитывая определение (9.12), получим

$$\boxed{\frac{pV}{N} = kT.} \qquad (9.13)$$

По этой формуле вводится температурная шкала (в градусах), не зависящая от вещества, используемого для измерения температуры.

Температура, определяемая формулой (9.13), очевидно, не может быть отрицательной, так как все величины, стоящие в левой части этой формулы, заведомо положительны. Следовательно, наименьшим возможным значением температуры T является значение $T = 0$, если давление p или объём V равны нулю.

Запомни Предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в нуль при фиксированном объёме или при которой объём идеального газа стремится к нулю при неизменном давлении, называют **абсолютным нулём температуры**.

Это самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказывал Ломоносов.

Английский учёный У. Томсон (лорд Кельвин) (1824—1907) ввёл абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (её называют также *шкалой Кельвина*) соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

Запомни Единица абсолютной температуры в СИ называется **кельвином** (обозначается буквой К).

Постоянная Больцмана. Определим коэффициент k в формуле (9.13) так, чтобы изменение температуры на один кельвин (1 К) было равно изменению температуры на один градус по шкале Цельсия (1 °С).

Мы знаем значения величины Θ при 0 °С и 100 °С (см. формулы (9.9) и (9.11)). Обозначим абсолютную температуру при 0 °С через T_1, а при 100 °С через T_2. Тогда согласно формуле (9.12)

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1),$$

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k \cdot 100 \text{ К} = (5{,}14 - 3{,}76) \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Отсюда

$$k = \frac{5{,}14 - 3{,}76}{100} \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Запомни Коэффициент

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \qquad (9.14)$$

называется **постоянной Больцмана** в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов.

Важно Постоянная Больцмана связывает температуру Θ в энергетических единицах с температурой T в кельвинах.

Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.

Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия. Для этого найдём сначала значение абсолютной температуры, соответствующее 0 °С. Так как при 0 °С $kT_1 = 3{,}76 \cdot 10^{-21}$ Дж, то

$$T_1 = \frac{3{,}76 \cdot 10^{-21}}{1{,}38 \cdot 10^{-23}} \text{ К} \approx 273 \text{ К}.$$

Л. Больцман
(1844—1906)

Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают.

Поэтому любое значение абсолютной температуры T будет на 273 градуса выше соответствующей температуры t по Цельсию:

$$T \text{ (К)} = (t + 273) \text{ (°С)}. \qquad (9.15)$$

Важно Изменение абсолютной температуры ΔT равно изменению температуры по шкале Цельсия Δt: ΔT(К) $= \Delta t$ (°С).

Следует ли из фразы «Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают», что 27 °C = 27 K?

На рисунке 9.5 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия. Абсолютному нулю соответствует температура $t = -273$ °C.

Интересно В США используется шкала Фаренгейта. Точка замерзания воды по этой шкале 32 °F, а точка кипения 212 °F. Пересчёт температуры из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия производится по формуле t(°C) = 5/9 (t(°F) − 32).

Отметим важнейший факт: абсолютный нуль температуры недостижим!

Температура — мера средней кинетической энергии молекул. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории (9.8) и определения температуры (9.13) вытекает важнейшее следствие:

Важно абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул.

Докажем это.

Из уравнений (9.7) и (9.13) следует, что $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3}\overline{E}$ и $\frac{pV}{N} = kT$. Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекулы и температурой:

$$\boxed{\overline{E} = \frac{3}{2}kT.} \qquad (9.16)$$

Важно Средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

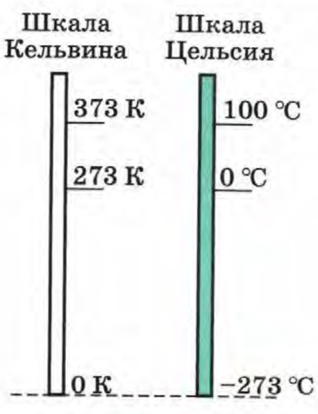


Рис. 9.5

Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы. Таким образом, выдвинутая ранее догадка о связи температуры со средней скоростью молекул получила надёжное обоснование. Соотношение (9.16) между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул установлено для идеальных газов. Однако оно оказывается справедливым для любых веществ, у которых движение атомов или молекул подчиняется законам механики Ньютона. Оно верно для жидкостей, а также и для твёрдых тел, где атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решётки. При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул приближается к нулю, т. е. прекращается поступательное тепловое движение молекул.

Обсудите с одноклассником, можно ли считать, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул — мера температуры.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры. Учитывая, что $\frac{N}{V} = n$, из формулы (9.13) получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

> Выведите закон Авогадро, используя соотношение (9.17).

$$\boxed{p = nkT.} \qquad (9.17)$$

Из формулы (9.17) вытекает, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Отсюда следует *закон Авогадро*, известный вам из курса химии.

Закон Авогадро

В равных объёмах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.

Абсолютная температура. Постоянная Больцмана. Закон Авогадро Найти

1. На каком основании можно предполагать существование связи между температурой и кинетической энергией молекул?
2. Как связаны объём, давление и число молекул различных газов в состоянии теплового равновесия?
3. Чему равен абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия?
4. Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению со шкалой Цельсия?
5. Каков физический смысл постоянной Больцмана? Можно ли её определить теоретически, не обращаясь к эксперименту?
6. Как зависит от температуры средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа?
7. Почему концентрация молекул всех газов одна и та же при одинаковых давлениях и температурах?
8. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул от их массы?

A1. Температура газа в сосуде равна 2 °С. По абсолютной шкале температур это составляет

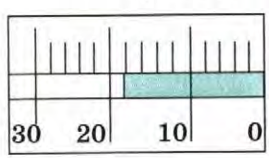
1) 136,5 К 2) 271 К 3) 275 К 4) 546 К

A2. На рисунке показана часть шкалы комнатного термометра. Определите абсолютную температуру воздуха в комнате.

1) 22 °С 2) 18 °С 3) 295 К 4) 291 К

A3. Как изменится средняя кинетическая энергия теплового движения одноатомного идеального газа при повышении его температуры в 2 раза?

1) увеличится в 4 раза
2) увеличится в 2 раза
3) уменьшится в 2 раза
4) уменьшится в 4 раза



A4. В закрытом сосуде абсолютная температура идеального газа уменьшилась в 3 раза. При этом давление газа на стенки сосуда

1) увеличилось в 9 раз
2) уменьшилось в 3 раза
3) уменьшилось в $\sqrt{3}$ раза
4) не изменилось

§ 61 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Можно ли, зная температуру, вычислить среднюю кинетическую энергию молекул газа? среднюю скорость молекулы?
А можно ли эту скорость измерить?

Средняя скорость теплового движения молекул. Уравнение (9.16) даёт возможность найти средний квадрат скорости движения молекулы. Подставив в это уравнение $\overline{E} = \frac{m_0\overline{v^2}}{2}$, получим выражение для среднего значения квадрата скорости:

$$\overline{v^2} = 3\,\frac{kT}{m_0}. \qquad (9.18)$$

Запомни Средней квадратичной скоростью называется величина

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \qquad (9.19)$$

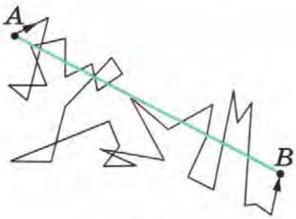


Рис. 9.6

Вычисляя по формуле (9.19) скорость молекул, например азота при $t = 0$ °C, получаем $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 500$ м/с. Молекулы водорода при той же температуре имеют среднюю квадратичную скорость $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 1800$ м/с. Эти скорости велики, но так как молекулы газа движутся хаотично, непрерывно сталкиваясь друг с другом, и время между двумя столкновениями мало, то расстояние, которое пролетают молекулы также невелико. Из-за столкновения траектория каждой молекулы представляет собой запутанную ломаную линию (рис. 9.6). Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Как видно из рисунка, при перемещении молекулы из точки A в точку B пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния AB. При атмосферном давлении это расстояние порядка 10^{-5} см.

Интересно Когда впервые были получены эти числа (вторая половина XIX в.), многие физики были ошеломлены. Скорости молекул газа по расчётам оказались больше, чем скорости артиллерийских снарядов! На этом основании высказывали даже сомнения в справедливости кинетической теории. Ведь известно, что запахи распространяются довольно медленно: нужно время порядка десятков секунд, чтобы запах духов, пролитых в одном углу комнаты, распространился до другого угла.

Экспериментальное определение скоростей молекул. Опыты по определению скоростей молекул доказали справедливость формулы (9.19). Один из опытов был предложен и осуществлён О. Штерном в 1920 г.

Подумайте, что определяет среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул и от чего зависит средняя квадратичная скорость этого движения.

Прибор Штерна состоит из двух коаксиальных цилиндров A и B, жёстко связанных друг с другом (рис. 9.7, *а*). Цилиндры могут вращаться с постоянной угловой скоростью. Вдоль оси малого цилиндра натянута тонкая платиновая проволочка C, покрытая слоем серебра.

По проволочке пропускают электрический ток. В стенке этого цилиндра имеется узкая щель O. Воздух из цилиндров откачан. Цилиндр B находится при комнатной температуре. Вначале прибор неподвижен. При прохождении тока по нити она нагревается и при температуре 1200 °C атомы серебра испаряются. Внутренний цилиндр заполняется газом из атомов серебра. Некоторые атомы пролетают через щель O и, достигнув внутренней поверхности цилиндра B, осаждаются на ней. В результате прямо против щели образуется узкая полоска D серебра (рис. 9.7, *б*).

Затем цилиндры приводят во вращение с большим числом оборотов n в секунду (до 1500 $\frac{1}{с}$).

Теперь за время t, необходимое атому для прохождения пути, равного разности радиусов цилиндров $R_B - R_A$, цилиндры повернутся на некоторый угол φ. В результате атомы, движущиеся с постоянной скоростью, попадают на внутреннюю поверхность большого цилиндра не прямо против щели O (рис. 9.7, *в*), а на некотором расстоянии s от конца радиуса, проходящего через середину щели (рис. 9.7, *г*): ведь атомы движутся прямолинейно.

Интересно

В 1943 г. О. Штерн был удостоен Нобелевской премии по физике «за вклад в развитие методов молекулярных пучков и открытие и измерение магнитного момента протона».

Как вы думаете, почему проволочка сделана из платины?

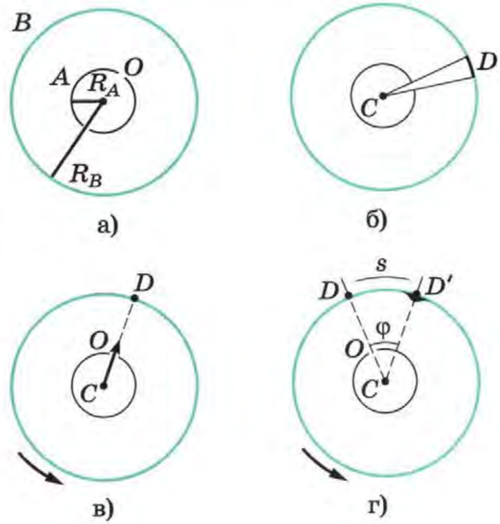


Рис. 9.7

Если через v_B обозначить модуль скорости вращения точек поверхности внешнего цилиндра, то

$$s = v_B t = 2\pi n R_B t. \qquad (9.20)$$

В действительности атомы серебра имеют разные скорости. Поэтому расстояния s для различных атомов будут несколько различаться. Под s следует понимать расстояние между участками на полосках D и D' с наибольшей толщиной слоя серебра. Этому расстоянию будет соответствовать средняя скорость атомов, которая равна $\bar{v} = \frac{R_B - R_A}{t}$.

Подставляя в эту формулу значение времени t из выражения (9.20), получаем

$$\bar{v} = \frac{2\pi n (R_B - R_A)}{s} R_B.$$

Обсудите с товарищем, почему скорость вращения цилиндров должна быть большой.

Зная n, R_A и R_B и измеряя среднее смещение полоски серебра, вызванное вращением прибора, можно найти среднюю скорость атомов серебра.

Модули скоростей, определённые из опыта, совпадают с теоретическим значением средней квадратичной скорости. Это служит экспериментальным доказательством справедливости формулы (9.19), а следовательно, и формулы (9.16), согласно которой средняя кинетическая энергия молекулы прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Средняя квадратичная скорость молекул. Опыт Штерна | Найти

1. Почему толщина слоя полоски серебра на поверхности внешнего вращающегося цилиндра в опыте Штерна неодинакова по ширине полоски?
2. Как изменится средняя квадратичная скорость движения молекул при уменьшении температуры в 4 раза?
3. Какие молекулы в атмосфере движутся быстрее: молекулы азота или молекулы кислорода?

A1. В сосуде находится газ. Масса каждой молекулы газа равна m, средняя квадратичная скорость молекул $\bar{v}_{кв}$, абсолютная температура газа T. Если абсолютная температура газа увеличится до $2T$, средняя квадратичная скорость молекул газа будет равна

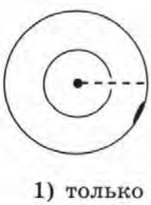
1) $4\bar{v}_{кв}$ 2) $2\bar{v}_{кв}$ 3) $\sqrt{2}\bar{v}_{кв}$ 4) $0,5\bar{v}_{кв}$

A2. Как соотносятся средние квадратичные скорости молекул кислорода $\bar{v}_{кв.\ кисл}$ и $\bar{v}_{кв.\ вод}$ в смеси этих газов в состоянии теплового равновесия, если отношение молярных масс кислорода и водорода равно 16?

1) $\bar{v}_{кв.\ кисл} = \bar{v}_{кв.\ вод}$
2) $\bar{v}_{кв.\ кисл} = 16\bar{v}_{кв.\ вод}$
3) $\bar{v}_{кв.\ кисл} = 4\bar{v}_{кв.\ вод}$
4) $\bar{v}_{кв.\ кисл} = \bar{v}_{кв.\ вод}/4$

A3. В двух сосудах находятся различные газы. Масса каждой молекулы газа в первом сосуде равна m, во втором сосуде $3m$. Средняя квадратичная скорость молекул газа в первом сосуде равна $\bar{v}_{кв}$, во втором сосуде $\bar{v}_{кв}/3$. Абсолютная температура газа в первом сосуде равна T, во втором сосуде она равна

1) $3T$ 2) T 3) $T/3$ 4) $T/9$



A4. На рисунке показана схема опыта Штерна по определению скорости молекул. Пунктиром обозначена траектория атомов серебра, летящих от проволоки в центре установки через щель во внутреннем цилиндре к внешнему цилиндру при неподвижных цилиндрах. Чёрным отмечено место, куда попадали атомы серебра при вращении цилиндров. Какое утверждение верно? Пятно образовалось, когда

1) только внешний цилиндр вращался по часовой стрелке
2) только внутренний цилиндр вращался по часовой стрелке
3) оба цилиндра вращались по часовой стрелке
4) оба цилиндра вращались против часовой стрелки

§ 62 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ»

При решении задач этой главы используются формула (9.13), определяющая абсолютную температуру, формула (9.16), связывающая энергию беспорядочного движения с температурой, и формула (9.19) для средней квадратичной скорости молекул. Некоторые задачи удобно решать, используя формулу (9.17). Для расчётов надо знать значение постоянной Больцмана (9.14).

Задача 1. Чему равно отношение произведения давления газа на его объём к числу молекул при температуре $t = 300$ °C?

Решение. Согласно формуле (9.13) $pV/N = kT$, где $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Так как абсолютная температура $T = t + 273$ (К) $= 573$ К, то $pV/N = 7{,}9 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Задача 2. Определите среднюю квадратичную скорость молекулы газа при 0 °C. Молярная масса газа $M = 0{,}019$ кг/моль.

Решение. Средняя квадратичная скорость молекул вычисляется по формуле (9.19). Учитывая, что $m_0 = M/N_A$ и $T = 273$ К, получим

$$\bar{v}_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}} \approx 600 \frac{м}{с}.$$

Задача 3. Некоторое количество водорода находится при температуре $T_1 = 200$ К и давлении $p_1 = 400$ Па. Газ нагревают до температуры $T_2 = 10\,000$ К, при которой молекулы водорода практически полностью распадаются на атомы. Определите значение давления p_2 газа при температуре T_2, если его объём и масса остались без изменения.

Решение. Согласно формуле (9.17) давление газа при температуре T_1 равно $p_1 = n_1kT_1$, где n_1 — концентрация молекул водорода.

При расщеплении молекул водорода на атомы число частиц в сосуде увеличивается в 2 раза. Следовательно, концентрация атомов водорода равна $n_2 = 2n_1$. Давление атомарного водорода $p_2 = n_2kT_2 = 2n_1kT_2$.

Разделив почленно второе уравнение на первое, получим

$$p_2 = p_1\frac{2T_2}{T_1} = 40 \text{ кПа}.$$

Задача 4. В опыте Штерна источник атомов серебра создаёт узкий пучок, который падает на внутреннюю поверхность неподвижного цилиндра радиуса $R = 30$ см и образует на ней пятно. Цилиндр начинает вращаться с угловой скоростью $\omega = 314$ рад/с. Определите скорость атомов серебра, если пятно отклонилось на угол $\varphi = 0{,}314$ рад от первоначального положения.

Решение. Угол, на который отклонилось пятно, $\varphi = \omega t$, средняя скорость атомов серебра $\bar{v} = \frac{R}{t}$. Выразив из первого уравнения время t и подставив во второе, получим $\bar{v} = \frac{R\omega}{\varphi} = 300$ м/с.

Задача 5. Средняя энергия молекулы идеального газа $\overline{E} = 6{,}4 \cdot 10^{-21}$ Дж. Давление газа $p = 4$ мПа. Определите число молекул газа в единице объёма.

Решение. Средняя энергия поступательного движения молекул идеального газа

$$\overline{E} = (3/2)kT.$$

Давление

$$p = nkT,$$

где n — концентрация молекул, k — постоянная Больцмана и T — абсолютная температура газа. Решая совместно эти два уравнения, получаем

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{3}{2}\frac{p}{\overline{E}} = 9{,}38 \cdot 10^{17}\ \text{м}^{-3}.$$

Задача 6. Откачанная лампа накаливания объёмом $V = 10$ см^3 имеет трещину, в которую проникает $\Delta N = 10^6$ частиц газа за время $\Delta t = 1$ с. Сколько времени понадобится, чтобы в лампе установилось нормальное давление ($p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па)? Температура 0 °С.

Решение. Определим, сколько молекул газа N_0 должно быть в лампе при нормальном давлении: $N_0 = n_0V$, где n_0 — концентрация молекул, определяемая из уравнения $p_0 = n_0kT$, $n_0 = p_0/kT$.

Число молекул будет равно $N_0 = n_0V = p_0V/kT$.

Следовательно, считая скорость проникновения молекул в сосуд постоянной, определим t: $t = \dfrac{N_0}{\Delta N/\Delta t} = \dfrac{p_0V\Delta t}{kT\Delta N} = 2{,}69 \cdot 10^{14}$ с, $t = 8{,}53 \cdot 10^6$ лет.

Задачи для самостоятельного решения

1. Какое значение имела бы постоянная Больцмана, если бы единица температуры в СИ — кельвин — была равна не 1 °С, а 2 °С?

2. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ Па (10^{-12} мм рт. ст.). Сколько молекул газа содержится в 1 см^3 при указанном давлении и температуре 27 °С?

3. Средняя квадратичная скорость молекулы газа, находящегося при температуре 100 °С, равна 540 м/с. Определите массу молекулы.

4. На сколько процентов увеличивается средняя квадратичная скорость молекул воды в нашей крови при повышении температуры от 37 до 40 °С?

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 9 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

ГЛАВА 10 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В этой главе вы не встретите принципиально новых сведений о газах. Речь пойдёт о следствиях, которые можно извлечь из понятия температуры и других макроскопических параметров. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов вплотную приблизило нас к установлению связей между этими параметрами.

§ 63 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Как можно рассчитать массу воздуха в кабинете физики?
Какие параметры воздуха будут необходимы для определения этой массы?

Мы детально рассмотрели поведение идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Была определена зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры (см. формулу (9.17)).

Интересно Заметим, что формулой (9.17) можно пользоваться только до давления порядка 10 атм.

На основе этой зависимости можно получить уравнение, связывающее все три макроскопических параметра p, V и T, характеризующие состояние идеального газа данной массы.

Запомни Уравнение, связывающее три макроскопических параметра p, V и T, называют **уравнением состояния идеального газа**.

Подставим в уравнение $p = nkT$ выражение для концентрации молекул газа. Учитывая формулу (8.8), концентрацию газа можно записать так:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V}\frac{m}{M}N_A, \qquad (10.1)$$

где N_A — постоянная Авогадро, m — масса газа, M — его молярная масса. После подстановки формулы (10.1) в выражение (9.17) будем иметь

$$pV = \frac{m}{M}kN_AT. \qquad (10.2)$$

Запомни Произведение постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A называют **универсальной (молярной) газовой постоянной** и обозначают буквой R:

$$R = kN_A = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{Дж/К} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ 1/\text{моль} = 8{,}31\ \text{Дж/(моль} \cdot \text{К)}. \qquad (10.3)$$

Подставляя в уравнение (10.2) вместо kN_A универсальную газовую постоянную R, получаем

Важно уравнение состояния идеального газа произвольной массы

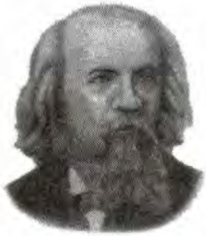
$$pV = \frac{m}{M}RT. \qquad (10.4)$$

Единственная величина в этом уравнении, зависящая от рода газа, — это его молярная масса.

Из уравнения состояния вытекает связь между давлением, объёмом и температурой идеального газа, который может находиться в двух любых состояниях.

Если индексом *1* обозначить параметры, относящиеся к первому состоянию, а индексом *2* — параметры, относящиеся ко второму состоянию, то согласно уравнению (10.4) для газа данной массы

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{m}{M}R \quad \text{и} \quad \frac{p_2V_2}{T_2} = \frac{m}{M}R.$$



Д. И. Менделеев
(1834—1907)

Правые части этих уравнений одинаковы, следовательно, должны быть равны и их левые части:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = \text{const}. \qquad (10.5)$$

Известно, что один моль любого газа при нормальных условиях (p_0 = 1 атм = 1,013 · 10^5 Па, t = 0 °C или T = 273 К) занимает объём 22,4 л. Для одного моля газа, согласно соотношению (10.5), запишем:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} = \frac{1{,}013 \cdot 10^5 \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}}{273}\,\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{К}} = 8{,}31\,\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Мы получили значение универсальной газовой постоянной R.

Таким образом, для одного моля любого газа $\frac{pV}{T} = R$.

Запомни Уравнение состояния в форме (10.4) было впервые получено великим русским учёным Д. И. Менделеевым. Его называют **уравнением Менделеева—Клапейрона**.
Уравнение состояния в форме (10.5) называется **уравнением Клапейрона** и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Интересно Б. Клапейрон в течение 10 лет работал в России профессором в институте путей сообщения. Вернувшись во Францию, участвовал в постройке многих железных дорог и составил множество проектов по постройке мостов и дорог.
Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.

Уравнение состояния не надо выводить каждый раз, его надо запомнить. Неплохо было бы помнить и значение универсальной газовой постоянной:

$$R = 8{,}31\ \text{Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

До сих пор мы говорили о давлении идеального газа. Но в природе и в технике мы очень часто имеем дело со смесью нескольких газов, которые при определённых условиях можно считать идеальными.

Самый важный пример смеси газов — воздух, являющийся смесью азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов. Чему же равно давление смеси газов?

Для смеси газов справедлив *закон Дальтона*.

Закон Дальтона

Давление смеси химически невзаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений:
$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_i + \ldots,$$
где p_i — парциальное давление i-й компоненты смеси.

Запомни **Парциальное давление** — давление отдельно взятого компонента газовой смеси, равное давлению, которое он будет оказывать, если занимает весь объём при той же температуре.

Уравнение состояния. Универсальная газовая постоянная Найти

1. Что называют уравнением состояния?
2. Какая форма уравнения состояния содержит больше информации: уравнение Клапейрона или уравнение Менделеева — Клапейрона?
3. Почему газовая постоянная R называется универсальной?
4. Сформулируйте закон Дальтона.

А1. Уравнение Менделеева—Клапейрона
1) связывает между собой макропараметры газа
2) связывает между собой микропараметры газа
3) связывает макропараметры газа с его микропараметрами
4) не связано ни с микропараметрами, ни с макропараметрами

А2. Кислород находится в сосуде вместимостью 0,4 м^3 под давлением $8{,}3 \cdot 10^5$ Па и при температуре 320 К. Чему равна масса кислорода? Молярная масса кислорода 0,032 кг/моль.
1) 2 кг 2) 0,4 кг 3) 4 кг 4) $2 \cdot 10^{-23}$ кг

А3. Азот массой 0,3 кг при температуре 280 К оказывает давление на стенки сосуда, равное $8{,}3 \cdot 10^4$ Па. Чему равен объём газа? Молярная масса азота 0,028 кг/моль.
1) 0,3 м^3 2) 3,3 м^3 3) 0,6 м^3 4) 60 м^3

А4. В сосуде находится жидкий азот N_2 массой 10 кг. Какой объём займёт этот газ при нормальных условиях (273 К; 100 кПа)? Молярная масса азота 0,028 кг/моль.
1) 4,05 м^3 2) 8,1 м^3 3) 16,2 м^3 4) 24,3 м^3

А5. В баллоне вместимостью 1,66 м^3 находится азот массой 2 кг при давлении 100 кПа. Чему равна температура этого газа? Молярная масса азота 0,028 кг/моль.
1) 280 °С 2) 140 °С 3) 7 °С 4) −13 °С

§ 64 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА»

При решении задач по данной теме надо чётко представлять себе начальное состояние системы и какой процесс переводит её в конечное состояние. Одна из типичных задач на использование уравнения состояния идеального газа: требуется определить параметры системы в конечном состоянии по известным макроскопическим параметрам в её начальном состоянии.

Задача 1. Воздух состоит из смеси газов (азота, кислорода и т. д.). Плотность воздуха ρ_0 при нормальных условиях (температура $t_0 = 0$ °C и атмосферное давление $p_0 = 101\ 325$ Па) равна 1,29 кг/м^3. Определите среднюю (эффективную) молярную массу M воздуха.

Решение. Уравнение состояния идеального газа при нормальных условиях имеет вид $p_0V_0 = \frac{m}{M}RT_0$. Здесь $R = 8{,}31$ Дж/(моль · К) и $T_0 = 0$ °C $+ 273$ °C $= 273$ К, M — эффективная молярная масса воздуха. Эффективная молярная масса смеси газов — это молярная масса такого воображаемого газа, который в том же объёме и при той же температуре оказывает на стенки сосуда то же давление, что и смесь газов, в данном случае воздух. Отсюда $M = \frac{mRT_0}{p_0T_0} = \frac{\rho_0 RT_0}{p_0} = 0{,}029$ кг/моль.

Задача 2. Определите температуру кислорода массой 64 г, находящегося в сосуде объёмом 1 л при давлении $5 \cdot 10^6$ Па. Молярная масса кислорода $M = 0{,}032$ кг/моль.

Решение. Согласно уравнению Менделеева—Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$. Отсюда температура кислорода $T = \frac{pVM}{mR} = 300$ К.

Задача 3. Определите плотность азота при температуре 300 К и давлении 2 атм. Молярная масса азота $M = 0{,}028$ кг/моль.

Решение. Запишем уравнение Менделеева—Клапейрона: $pV = \frac{m}{M}RT$. Разделив на объём левую и правую части равенства, получим

$p = \frac{m}{VM}RT = \frac{\rho}{M}RT$, откуда $\rho = \frac{pM}{RT} \approx 2{,}28$ кг/м^3.

Задача 4. Определите, на сколько масса воздуха в комнате объёмом 60 м^3 зимой при температуре 290 К больше, чем летом при температуре 27 °C. Давление зимой и летом равно 10^5 Па.

Решение. Запишем уравнение Менделеева—Клапейрона: $pV = \frac{m}{M}RT$. Из этого уравнения выразим массу газа: $m = \frac{pVM}{RT}$, где T принимает значения

T_1 и T_2 — температуры воздуха зимой и летом. Молярная масса воздуха $M = 0{,}029$ кг/моль. Температура воздуха летом $T_2 = 27\ ^\circ\text{C} + 273\ ^\circ\text{C} = 300$ К.

Таким образом, $\Delta m = m_1 - m_2 = \dfrac{pVM}{R}\left(\dfrac{1}{T_1} - \dfrac{1}{T_2}\right) = 2{,}4$ кг.

Задачи для самостоятельного решения

1. Чему равен объём идеального газа в количестве одного моля при нормальных условиях?

2. Определите массу воздуха в классе размером 6×8×3 м при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении. Молярную массу воздуха примите равной 0,029 кг/моль.

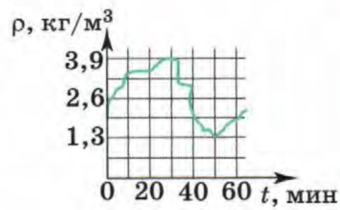
3. В баллоне вместимостью 0,03 м^3 находится газ под давлением $1{,}35 \cdot 10^6$ Па при температуре 455 °С. Какой объём занимал бы этот газ при нормальных условиях ($t_0 = 0$ °С, $p = 101\ 325$ Па)?

4. Выразите среднюю квадратичную скорость молекулы через универсальную газовую постоянную и молярную массу.

5. При переходе газа определённой массы из одного состояния в другое его давление уменьшается, а температура увеличивается. Как изменяется его объём?

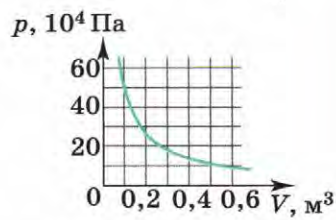
C1. При температуре 240 К и давлении 166 кПа плотность газа равна 2 кг/м^3. Чему равна молярная масса этого газа?

C2. Плотность идеального газа меняется с течением времени так, как показано на рисунке. Температура газа при этом постоянна. Во сколько раз давление газа при максимальной плотности больше, чем при минимальной?

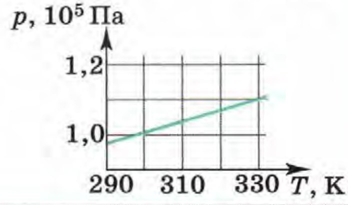


C3. Газ находится в баллоне вместимостью 8,31 л при температуре 127 °С и давлении 100 кПа. Какое количество вещества содержится в газе?

C4. На рисунке показан график изменения давления идеального газа при его расширении. Какое количество газообразного вещества (в молях) содержится в этом сосуде, если температура газа постоянна и равна 300 К?



C5. На рисунке показан график зависимости давления газа в запаянном сосуде от его температуры. Объём сосуда равен 0,4 м^3. Сколько молей газа содержится в этом сосуде?



§ 65 ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Вспомните, состояние какого газа описывает уравнение Менделеева—Клапейрона.
Можно ли универсальную газовую постоянную считать фундаментальной постоянной?

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса газа и один из трёх параметров — давление, объём или температура — остаются неизменными.

Запомни Количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего называют **газовыми законами**.
Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров, называют **изопроцессами**.

Интересно Слово «изопроцесс» — сложное слово, первая часть которого происходит от греческого слова isos — равный, одинаковый.

Отметим, что в действительности ни один процесс не может протекать при строго фиксированном значении какого-либо параметра. Всегда имеются те или иные воздействия, нарушающие постоянство температуры, давления или объёма. Лишь в лабораторных условиях удаётся поддерживать постоянство того или иного параметра с высокой точностью, но в действующих технических устройствах и в природе это практически неосуществимо. Изопроцесс — это идеализированная модель реального процесса, которая только приближённо отражает действительность.

Изотермический процесс.

Запомни Процесс изменения состояния системы макроскопических тел (*термодинамической системы*) при постоянной температуре называют **изотермическим.**

Интересно Слово «изотермический» происходит от греческих слов isos — равный, одинаковый и therme — теплота.

Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплом с большой системой — термостатом. Иначе при сжатии или расширении температура газа будет меняться. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении всего процесса. Согласно уравнению состояния идеального газа (10.4), если масса газа не изменяется, в любом состоянии с неизменной температурой произведение давления газа на его объём остаётся постоянным:

$$\boxed{pV = \text{const при } T = \text{const.}} \qquad (10.6)$$

Этот вывод был сделан английским учёным Р. Бойлем (1627—1691) и несколько позже французским учёным Э. Мариоттом (1620—1684) на основе эксперимента. Поэтому он носит название *закона Бойля—Мариотта.*

Закон Бойля—Мариотта Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объём постоянно.

Закон Бойля—Мариотта справедлив обычно для любых газов, а также и для их смесей, например для воздуха. Лишь при давлениях, в несколько сотен раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.

Запомни Кривую, изображающую зависимость давления газа от объёма при постоянной температуре, называют **изотермой.**

Изотерма газа изображает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объёмом. Кривую такого рода в математике называют *гиперболой* (рис. 10.1).

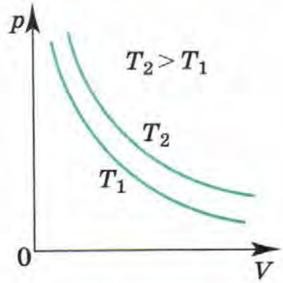


Рис. 10.1

Различным постоянным температурам соответствуют различные изотермы. При повышении температуры газа давление согласно уравнению состояния (10.4) увеличивается, если V = const. Поэтому изотерма, соответствующая более высокой температуре T_2, лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре T_1 (см. рис. 10.1).

Начертите изотермы в осях p, T и V, T.

Для того чтобы процесс происходил при постоянной температуре, сжатие или расширение газа должно происходить очень медленно. Дело в том, что, например, при сжатии газ нагревается, так как при движении поршня в сосуде скорость и соответственно кинетическая энергия молекул после ударов о поршень увеличиваются, а следовательно, увеличивается и температура газа. Именно поэтому для реализации изотермического процесса надо после небольшого смещения поршня подождать, когда температура газа в сосуде опять станет равной температуре окружающего воздуха.

Кроме этого, отметим, что при быстром сжатии давление под поршнем сразу становится больше, чем во всём сосуде. Если значения давления и температуры в различных точках объёма разные, то в этом случае газ находится в неравновесном состоянии и мы не можем назвать значения температуры и давления, определяющие в данный момент состояние системы. Если систему предоставить самой себе, то температура и давление постепенно выравниваются, система приходит в равновесное состояние.

Запомни **Равновесное состояние** — это состояние, при котором температура и давление во всех точках объёма одинаковы.

Параметры состояния газа могут быть определены, если он находится в равновесном состоянии.

Запомни Процесс, при котором все промежуточные состояния газа являются равновесными, называют **равновесным процессом**.

Очевидно, что на графиках зависимости одного параметра от другого мы можем изображать только равновесные процессы.

Изобарный процесс.

Запомни Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют **изобарным**.

Интересно Слово «изобарный» происходит от греческих слов isos — равный, одинаковый и baros — вес, тяжесть.

Согласно уравнению (10.4) в любом состоянии газа с неизменным давлением отношение объёма газа к его температуре остаётся постоянным:

$$\boxed{\frac{V}{T} = \text{const} \ \text{ при } \ p = \text{const}.} \qquad (10.7)$$

Этот закон был установлен экспериментально в 1802 г. французским учёным Ж. Гей-Люссаком (1778—1850) и носит название *закона Гей-Люссака.*

Закон Гей-Люссака Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объёма к абсолютной температуре постоянно.

Согласно уравнению (10.7) объём газа при постоянном давлении пропорционален температуре:

$$V = \text{const} \cdot T. \qquad (10.8)$$

Запомни Прямую, изображающую зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении, называют **изобарой.**

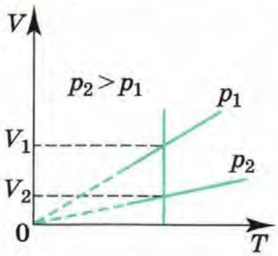


Рис. 10.2

Разным давлениям соответствуют разные изобары (рис. 10.2). Проведём на рисунке произвольную изотерму. С ростом давления объём газа при постоянной температуре согласно закону Бойля—Мариотта уменьшается. Поэтому изобара, соответствующая более высокому давлению p_2, лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1.

В области низких температур все изобары *идеального* газа сходятся в точке $T = 0$. Но это не означает, что объём *реального* газа обращается в нуль. Все газы при сильном охлаждении превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния (10.4) неприменимо.

Начертите изобары в осях p, T и p, V.

Именно поэтому, начиная с некоторого значения температуры, зависимость объёма от температуры проводится на графике штриховой линией. В действительности таких значений температуры и давления у вещества в газообразном состоянии быть не может.

Изобарным можно считать расширение газа при нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем, если внешнее давление постоянно. Давление в цилиндре постоянно и равно сумме атмосферного давления и давления $m_{\text{п}}g/S$ поршня.

Изохорный процесс.

Запомни Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называют **изохорным**.

Из уравнения состояния (10.4) вытекает, что в любом состоянии газа с неизменным объёмом отношение давления газа к его температуре остаётся постоянным:

Интересно Слово «изохорный» происходит от греческих слов isos — равный, одинаковый и chora — место, пространство, занимаемое чем-нибудь.

$$\boxed{\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{при} \quad V = \text{const}.} \qquad (10.9)$$

Этот газовый закон был установлен в 1787 г. французским физиком Ж. Шарлем (1746—1823) и носит название *закона Шарля*.

Закон Шарля Для газа данной массы отношение давления к абсолютной температуре постоянно, если объём не меняется.

Согласно уравнению (10.9) давление газа при постоянном объёме пропорционально температуре:

$$p = \text{const} \cdot T. \qquad (10.10)$$

Запомни Прямую, изображающую зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме, называют **изохорой.**

Разным объёмам соответствуют разные изохоры. Также проведём на рисунке произвольную изотерму (рис. 10.3). С ростом объёма газа при постоянной температуре давление его, согласно закону Бойля—Мариотта, падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объёму V_2, лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объёму V_1.

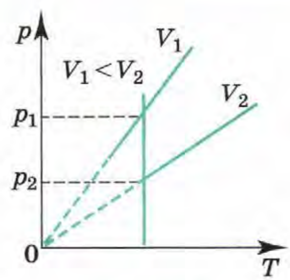


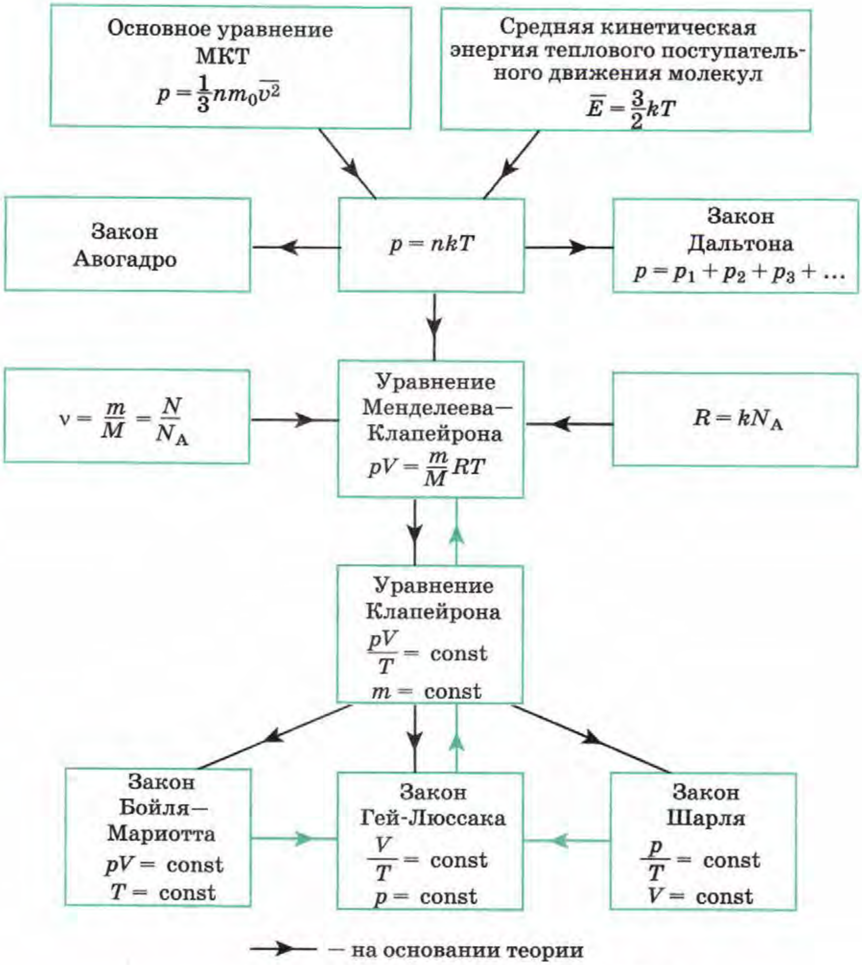
Рис. 10.3

В соответствии с уравнением (10.10) все изохоры идеального газа начинаются в точке $T = 0$. Значит, давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю.

Увеличение давления газа в любом сосуде или в электрической лампочке при нагревании можно считать изохорным процессом. Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объёма.

Можно ли утверждать, что изохорный процесс равновесный?
С какими процессами вы встречаетесь в повседневной жизни?

В заключение составим опорную схему (рис. 10.4) и покажем логические переходы, связывающие различные законы и уравнения.



Изопроцессы. Законы Бойля—Мариотта, Гей-Люссака, Шарля Найти

1. Вы надули щёки. При этом и объём, и давление воздуха у вас во рту увеличиваются. Как это согласовать с законом Бойля—Мариотта?
2. Как можно осуществить изотермический, изобарный и изохорный процессы?
3. Какое состояние системы (газа) считается равновесным?
4. Как качественно объяснить газовые законы на основе молекулярно-кинетической теории?

§ 66 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ»

Если при переходе газа из начального состояния в конечное один из параметров не меняется, то разумно использовать один из газовых законов (10.6), (10.7) или (10.9).

Для этого нужно знать зависимость параметров друг от друга, которая в общем случае даётся уравнением состояния, а в частных — газовыми законами.

Задача 1. Баллон вместимостью $V_1 = 0{,}02$ м^3, содержащий воздух под давлением $p_1 = 4 \cdot 10^5$ Па, соединяют с баллоном вместимостью $V_2 = 0{,}06$ м^3, из которого воздух выкачан. Определите давление p, которое установится в сосудах. Температура постоянна.

Р е ш е н и е. Воздух из первого баллона займёт весь предоставленный ему объём $V_1 + V_2$. По закону Бойля—Мариотта $p_1V_1 = p(V_2 + V_1)$.

Отсюда искомое давление $p = \dfrac{p_1V_1}{V_2 + V_1} = 10^5$ Па.

Задача 2. В запаянной пробирке находится воздух при атмосферном давлении и температуре 300 К. При нагревании пробирки на 100 °С она лопнула. Определите, какое максимальное давление выдерживает пробирка.

Р е ш е н и е. Объём воздуха при нагревании остаётся постоянным.

Для определения давления в пробирке при нагревании до 100 °С применяем закон Шарля $\dfrac{p_1}{T_1} = \dfrac{p_2}{T_2}$.

По условию $T_2 = 400$ К. Заметим, что изменение температуры по шкале Кельвина равно изменению температуры по шкале Цельсия.

Тогда давление $p_2 = \dfrac{p_1}{T_1}T_2 = 1{,}25$ атм.

Однако разорваться пробирке мешает атмосферное давление. Тогда окончательно давление, которое может выдержать пробирка, $p_{max} = p_{атм} + p_2 \approx \approx 2{,}25$ атм.

Задача 3. При нагревании газа при постоянном объёме на 1 К давление увеличилось на 0,2 %. Чему равна начальная температура газа?

Р е ш е н и е. Газ нагревается при постоянном объёме — процесс изохорный. По закону Шарля $\dfrac{p_1}{p_2} = \dfrac{T_1}{T_2}$, где $T_2 = T_1 + \Delta T$. Из условия задачи следует, что $p_2 = p_1 \cdot 1{,}002$, т. е. $\dfrac{p_1}{p_1 \cdot 1{,}002} = \dfrac{T_1}{T_1 + \Delta T}$, откуда $T_1 = \Delta T/0{,}002 = 500$ К.

Задача 4. Давление воздуха внутри бутылки, закрытой пробкой, равно 0,1 МПа при температуре $t_1 = 7$ °С. На сколько градусов нужно нагреть воздух в бутылке, чтобы пробка вылетела? Без нагревания пробку можно вынуть, прикладывая к ней силу 30 Н. Площадь поперечного сечения пробки 2 см^2.

Решение. Чтобы пробка вылетела из бутылки, необходимо, чтобы давление воздуха в бутылке было равно $p = \frac{F}{S} + p_0$.

При нагревании объём не изменяется. По закону Шарля $\frac{p_0}{T_1} = \frac{p}{T_2}$, откуда $T_2 = \frac{pT_1}{p_0}$. Следовательно, $\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{T_1 F}{p_0 S} = 420$ К.

Задачи для самостоятельного решения

1. Компрессор, обеспечивающий работу отбойных молотков, засасывает из атмосферы воздух объёмом $V = 100$ л в 1 с. Сколько отбойных молотков может работать от этого компрессора, если для каждого молотка необходимо обеспечить подачу воздуха объёмом $V_1 = 100$ см^3 в 1 с при давлении $p = 5$ МПа? Атмосферное давление $p_0 = 100$ кПа.

2. Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если давление газа увеличивается на 0,4 % от первоначального давления при нагревании на 1 К.

3. Высота пика Ленина на Памире равна 7134 м. Атмосферное давление на этой высоте равно $3{,}8 \cdot 10^4$ Па. Определите плотность воздуха на вершине пика при температуре 0 °С, если плотность воздуха при нормальных условиях 1,29 кг/м^3.

C1. Идеальный газ изотермически сжали из состояния с объёмом 6 л так, что давление газа изменилось в 3 раза. На сколько уменьшился объём газа в этом процессе?

C2. Поршень площадью 10 см^2 и массой 5 кг может без трения перемещаться в вертикальном цилиндрическом сосуде, обеспечивая при этом его герметичность. Сосуд с поршнем, заполненный газом, покоится на полу неподвижного лифта при атмосферном давлении 100 кПа, при этом расстояние от нижнего края поршня до дна сосуда 20 см. Каким станет это расстояние, когда лифт поедет вверх с ускорением, равным 2 м/с^2? Изменение температуры газа не учитывайте.

C3. С идеальным газом происходит изобарный процесс, в котором для увеличения объёма газа на 150 дм^3 его температуру увеличивают в 2 раза. Масса газа постоянна. Каким был первоначальный объём газа?

C4. Идеальный одноатомный газ в количестве $\nu = 0{,}09$ моль находится в равновесии в вертикальном цилиндре под поршнем массой 5 кг. Трение между поршнем и стенками цилиндра отсутствует. Внешнее атмосферное давление $p_0 = 100$ кПа. В результате нагревания газа поршень поднялся на высоту $\Delta h = 4$ см, а температура газа повысилась на $\Delta T = 16$ К. Чему равна площадь поршня?

C5. Идеальный газ изохорно нагревают так, что его температура изменяется на $\Delta T = 240$ К, а давление — в 1,8 раза. Масса газа постоянна. Определите начальную температуру газа по шкале Кельвина.

§ 67 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗА ПО ГРАФИКАМ ИЗОПРОЦЕССОВ»

При решении многих задач на газовые законы требуется построение графиков, изображающих разного рода процессы. На графиках обозначаем точки, определяющие состояния системы. Имеем в виду, что можно изобразить только равновесные процессы, при которых каждое промежуточное состояние равновесное, т. е. температура и давление одинаковы во всех точках данного объёма.

Задача 1. Постройте изобары для водорода массой 2 г при нормальном атмосферном давлении p_0 в координатах p, T; p, V; V, T.

Решение. На графиках зависимости p от T и p от V изобара представляет собой прямую, параллельную либо оси T, либо оси V (рис. 10.5, *а* и *б*). Так как $V = \frac{mR}{Mp_0}T$, то графиком зависимости V от T является прямая, проходящая через начало отсчёта. Учитывая, что $m = 0{,}002$ кг, $M = 0{,}002$ кг/моль, $R = 8{,}31$ Дж/(моль · К) и $p_0 = 10^5$ Па, можно записать: $V = BT$, где $B = \frac{mR_0}{Mp_0} \approx 8 \cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}^3}{\text{К}}$. В частности, при $T = 100$ К $V \approx 8 \cdot 10^{-3}$ м^3. График зависимости V от T показан на рисунке 10.5, *в*.

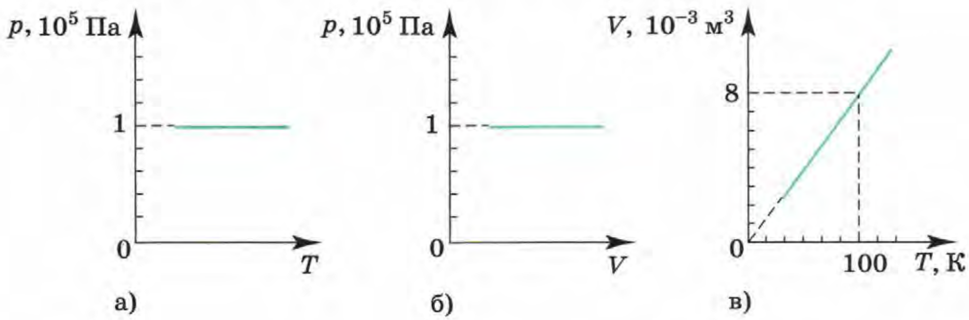


Рис. 10.5

Задача 2. Выведите уравнение Клапейрона при переходе газа из состояния *1* (p_1, V_1, T_1) в состояние *2* (p_2, V_2, T_2) (рис. 10.6, *а*).

Решение. Переведём газ из состояния *1* в состояние *2*, совершив два процесса: изотермический из состояния *1* в состояние *1′*, поддерживая постоянную температуру T_1, и изобарный из состояния *1′* в состояние *2*, поддерживая постоянным давление p_2 (рис. 10.6, *б*).

Согласно закону Бойля—Мариотта запишем: $p_1V_1 = p_2V'$, согласно закону Гей-Люссака $\frac{V'}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$. Выразив из первого и второго уравнений V' и при-

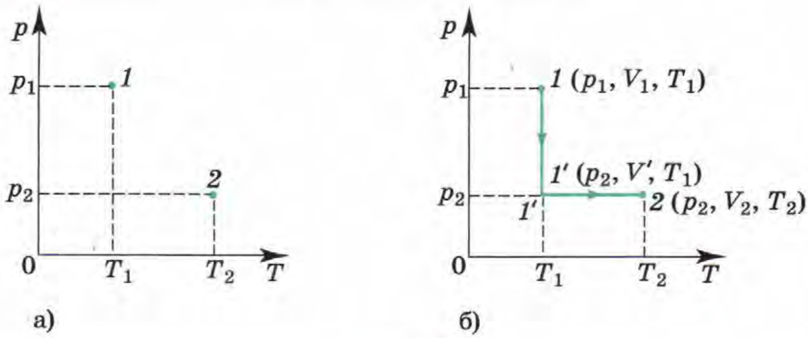


Рис. 10.6

равняв правые части полученных равенств, запишем: $\frac{p_1V_1}{p_2} = \frac{V_2T_1}{T_2}$. Перенеся параметры с индексом *1* в левую часть, а параметры с индексом *2* в правую, получим уравнение Клапейрона $\frac{p_1V_1}{T_2} = \frac{p_2V_2}{T_2}$. Для вывода уравнения мы использовали два экспериментально установленных закона: изотермический и изобарный.

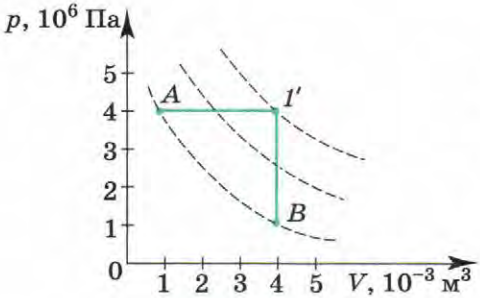


Рис. 10.7

Задача 3. На графике (рис. 10.7) показан переход газа, взятого в количестве 2 моль, из состояния A в состояние B. Определите изменение температуры газа, а также максимальное значение температуры при этом переходе.

Решение. По графику видно, что сначала газ нагревался при постоянном давлении, а затем давление уменьшалось при постоянном объёме, при этом температура уменьшалась.

Обратим внимание на то, что произведение давления на объём в состояниях A и B одно и то же и равно 4000 Па · м^3.

Согласно закону Менделеева—Клапейрона $T = \frac{pV}{\nu R} = 241$ К, $\Delta T = 0$.

Начертим изотермы, проходящие через отмеченные состояния. Согласно графикам максимальная температура соответствует промежуточному состоянию *1′*, для которого $V = 4$ л, а давление $4 \cdot 10^6$ Па. Тогда $T = 962$ К.

Задача 4. На рисунке 10.8, *а* изображён график перехода газа из состояния A в состояние B в координатах p, V. Постройте график этого перехода в координатах p, T и V, T.

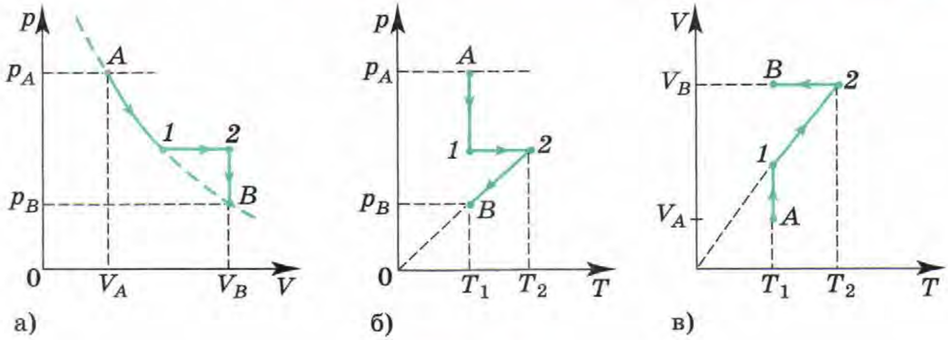


Рис. 10.8

Решение. Сначала построим график перехода в координатах p, T. Поставим точку, соответствующую состоянию A газа (рис. 10.8, *б*). Процесс $A—1$ изотермический. При этом давление газа уменьшается. Процесс $1—2$ изобарный. Построим отрезок, параллельный оси абсцисс. Процесс $2—B$ изохорный, при этом температура газа уменьшается. Начертим изохору, проходящую через точку 2. Конечное состояние соответствует давлению p_B.

Аналогично строим переход в координатах V, T (рис. 10.8, *в*). При процессе $A—1$ объём газа увеличивается при постоянной начальной температуре. При процессе $1—2$ объём увеличивается при постоянном давлении. Изобара проходит через начало координат. Конечное состояние соответствует объёму V_B. Затем процесс изохорный, при этом температура газа понижается.

Задачи для самостоятельного решения

1. Постройте изохоры для кислорода массой 16 г и объёмом 1 л в координатах p, V; V, T и p, T.

2. На рисунке 10.9 представлен график изменения состояния идеального газа в координатах V, T. Представьте этот процесс на графиках в координатах p, V и p, T.

3. Газ перешёл из состояния 1 в состояние 2 (рис 10.10). Масса газа постоянна. Как изменилось давление газа?

4. Начертите графики зависимости плотности газа от температуры при изобарном процессе и плотности газа от давления при изохорном процессе. Масса газа постоянна.

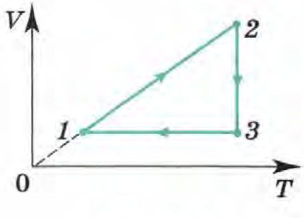


Рис. 10.9

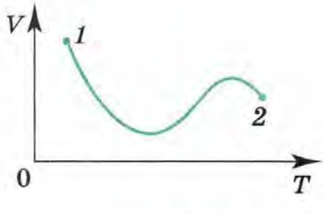
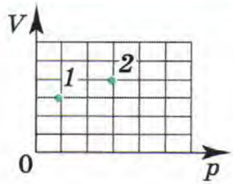
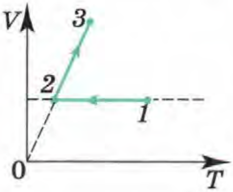


Рис. 10.10



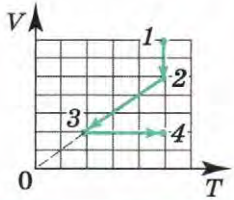
A1. В сосуде находится некоторое количество идеального газа. Какой станет температура газа, если он перейдёт из состояния *1* в состояние *2* (см. рис.)?

1) $T_2 = 4T_1$
2) $T_2 = \frac{T_1}{4}$
3) $T_2 = \frac{4T_1}{3}$
4) $T_2 = T_1$



A2. В координатах V, T представлена зависимость объёма идеального газа постоянной массы от абсолютной температуры. Как изменяется давление в процессе *1—2—3*?

1) на участках *1—2* и *2—3* увеличивается
2) на участках *1—2* и *2—3* уменьшается
3) на участке *1—2* уменьшается, на участке *2—3* остаётся неизменным
4) на участке *1—2* не изменяется, на участке *2—3* увеличивается



A3. В координатах V, T показано, как изменялись объём и температура некоторого разреженного газа, количество которого не изменялось, при его переходе из начального состояния *1* в состояние *4*. Как изменялось давление газа на участке *2—3*?

1) увеличивалось
2) уменьшалось
3) не изменялось
4) определить нельзя

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 10 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Основное уравнение МКТ и основное уравнение состояния идеального газа»

1. Статистические закономерности. Подходы к изучению поведения большого числа частиц. Средние значения.
2. Распределение молекул по скоростям — распределение Максвелла. Опыт Штерна.
3. Открытие газовых законов. Роберт Бойль, Эдм Мариотт, Жак Шарль, Жозеф Луи Гей-Люссак.

«Экспериментальное подтверждение газовых законов (схемы опытов, предложенные вами)»

«Моделирование и изготовление газового термометра, основанного на изобарном или изохорном процессе»

ГЛАВА 11 ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состояниях, но и объяснить процесс перехода вещества из одного состояния в другое.

§ 68 НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Вспомните, что представляет собой модель идеального газа. Можно ли с помощью этой модели объяснить явление конденсации?

Идеальный газ нельзя превратить в жидкость. В жидкость превращается реальный газ.

Испарение и конденсация. Молекулы жидкости движутся беспорядочно. Чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Среднее значение кинетической энергии молекул при заданной температуре имеет определённое значение. Но у каждой молекулы кинетическая энергия в данный момент времени может оказаться как меньше, так и больше средней. В какой-то момент времени кинетическая энергия отдельных молекул может стать настолько большой, что они окажутся способными вылететь из жидкости, преодолев силы притяжения остальных молекул.

Запомни Процесс превращения жидкости в пар называется **испарением.**

При этом процессе число молекул, покидающих жидкость за определённый промежуток времени, больше числа молекул, возвращающихся в неё.

Интересно Плотно закрытый флакон с духами может стоять очень долго, и количество духов в нём не изменится. Если же флакон оставить открытым, то через достаточно продолжительное время вы увидите, что жидкости в нём нет. Жидкость, в которой растворены ароматические вещества, испарилась. Гораздо быстрее испаряется (высыхает) лужа на асфальте, особенно если высока температура воздуха и дует ветер.

Если поток воздуха над сосудом уносит с собой образовавшиеся пары жидкости, то жидкость испаряется быстрее, так как у молекулы пара уменьшается возможность вновь вернуться в жидкость. Чем выше температура жидкости, тем большее число молекул имеет достаточную для вылета из жидкости кинетическую энергию, тем быстрее идёт испарение.

При испарении жидкость покидают более быстрые молекулы, поэтому средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается.

Процесс испарения происходит со свободной поверхности жидкости. Если лишить жидкость возможности испаряться, то охлаждение её будет происходить гораздо медленнее.

Интересно Смочив руку какой-нибудь быстро испаряющейся жидкостью (например, бензином или ацетоном), вы тут же почувствуете сильное охлаждение смоченного места. Охлаждение этого места усилится, если на руку подуть.

Интересно Вспомните, как долго остывает жирный бульон. Слой жира на его поверхности мешает выходу быстрых молекул воды. Жидкость почти не испаряется, и её температура падает медленно (сам жир испаряется крайне медленно, так как его большие молекулы более прочно сцеплены друг с другом, чем молекулы воды).

Вылетевшая молекула принимает участие в беспорядочном тепловом движении газа. Беспорядочно двигаясь, она может навсегда удалиться от поверхности жидкости, находящейся в открытом сосуде, но может и вернуться снова в жидкость.

Запомни Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией.**

При этом процессе число молекул, возвращающихся в жидкость за определённый промежуток времени, больше числа молекул, покидающих её.

Обсудите с товарищем, как можно ускорить процессы испарения жидкости и конденсации пара. Как и почему изменяется температура поверхности, на которой происходит конденсация пара?

Насыщенный пар. Если сосуд с жидкостью плотно закрыть, то сначала количество жидкости уменьшится, а затем будет оставаться постоянным. При неизменной температуре система жидкость—пар придёт в состояние теплового равновесия и будет находиться в нём сколь угодно долго. Одновременно с процессом испарения происходит и конденсация, оба процесса в среднем компенсируют друг друга.

В первый момент, после того как жидкость нальют в сосуд и закроют его, жидкость будет испаряться и плотность пара над ней будет увеличиваться. Однако одновременно с этим будет расти и число молекул, возвращающихся в жидкость. Чем больше плотность пара, тем большее число его молекул возвращается в жидкость. В результате в закрытом сосуде при постоянной температуре установится *динамическое* (подвижное) *равновесие* между жидкостью и паром.

Запомни **Динамическое равновесие** — это состояние, при котором число молекул, покидающих поверхность жидкости за некоторый промежуток времени, будет равно в среднем числу молекул пара, возвратившихся за то же время в жидкость.

Для воды при комнатной температуре это число приблизительно равно 10^{22} молекул за время, равное 1 с (на 1 см^2 площади поверхности).

Запомни Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.

Согласно этому определению в данном объёме при данной температуре не может находиться большее количество пара.

Если воздух из сосуда с жидкостью предварительно откачан, то в сосуде над поверхностью жидкости будет находиться только её насыщенный пар.

Испарение. Конденсация. Насыщенный пар

Найти

1. Почему в жару собака высовывает язык?
2. Приведите примеры динамического равновесия, подобного динамическому равновесию насыщенного пара и жидкости.
3. Какой пар называется насыщенным?

А1. При какой температуре молекулы могут покидать поверхность воды?
1) только при температуре кипения
2) только при температуре выше 100 °С
3) только при температуре выше 20 °С
4) при любой температуре выше 0 °С

А2. Хаотичность теплового движения молекул жидкости приводит к тому, что
1) жидкость в открытом сосуде испаряется при любой температуре
2) температура жидкости во время её кипения не изменяется
3) жидкость трудно сжать
4) жидкость при охлаждении кристаллизуется

А3. Вода может испаряться
1) только при кипении
2) только при нагревании
3) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является ненасыщенным
4) при любой температуре, если пар в воздухе над поверхностью воды является насыщенным

А4. Часть воды испарилась из чашки при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Температура воды, оставшейся в чашке,
1) увеличилась
2) уменьшилась
3) не изменилась
4) увеличилась или уменьшилась в зависимости от скорости испарения

А5. Закупоренную бутылку, которая наполовину заполнена квасом, из тёплой комнаты переносят на холодный балкон. Через некоторое время устанавливается тепловое равновесие. Какое из приведённых ниже утверждений верное? В начальном состоянии водяной пар в бутылке являлся
1) насыщенным паром, в конечном состоянии — ненасыщенным
2) ненасыщенным паром, в конечном состоянии — насыщенным
3) насыщенным паром, в конечном состоянии — тоже насыщенным
4) ненасыщенным паром, в конечном состоянии — тоже ненасыщенным

§ 69 ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Как вы думаете, что будет происходить с насыщенным паром, если уменьшить занимаемый им объём: например, если сжимать пар, находящийся в равновесии с жидкостью в цилиндре под поршнем, поддерживая температуру содержимого цилиндра постоянной?

При сжатии пара равновесие начнёт нарушаться. Плотность пара в первый момент немного увеличится, и из газа в жидкость начнёт переходить большее число молекул, чем из жидкости в газ. Ведь число молекул, покидающих жидкость в единицу времени, зависит только от температуры, и сжатие пара это число не меняет. Процесс продолжается до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие и плотность пара, а значит, и концентрация его молекул не примут прежних своих значений. Следовательно,

Важно концентрация молекул насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объёма.

Так как давление пропорционально концентрации молекул ($p = nkT$), то из этого определения следует, что

Важно давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объёма.

Запомни Давление $p_{\text{н. п}}$ пара, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют **давлением насыщенного пара.**

При сжатии насыщенного пара всё большая часть его переходит в жидкое состояние. Жидкость данной массы занимает меньший объём, чем пар той же массы. В результате объём пара при неизменной его плотности уменьшается.

Отметим ещё один важный факт.

Важно Газовые законы для насыщенного пара несправедливы (при любом объёме при постоянной температуре давление насыщенного пара одинаково). В то же время состояние насыщенного пара достаточно точно описывается уравнением Менделеева—Клапейрона.

Ненасыщенный пар.

Запомни Если пар постепенно сжимают при постоянной температуре, а превращение его в жидкость не происходит, то такой пар называют **ненасыщенным**.

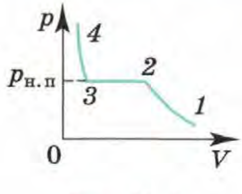


Рис. 11.1

При уменьшении объёма (рис. 11.1) давление ненасыщенного пара увеличивается (участок *1—2*) подобно тому, как изменяется давление при уменьшении объёма идеального газа. При определённом объёме пар становится насыщенным, и при дальнейшем его сжатии происходит превращение его в жидкость (участок *2—3*). В этом случае над жидкостью уже будет находиться насыщенный пар.

Как только весь пар превратится в жидкость, дальнейшее уменьшение объёма вызовет резкое увеличение давления (жидкость малосжимаема).

Предположите, как ведут себя молекулы пара и жидкости на разных участках кривой (см. рис. 11.1).

Однако пар превращается в жидкость не при любой температуре. Если температура выше некоторого значения, то, как бы мы ни сжимали газ, он никогда не превратится в жидкость.

Запомни Максимальная температура, при которой пар ещё может превратиться в жидкость, называется **критической температурой.**

Каждому веществу соответствует своя критическая температура, у гелия $T_{кр} = 4$ К, у азота $T_{кр} = 126$ К.

Запомни Состояние вещества при температуре выше критической называется **газом**; при температуре ниже критической, когда у пара есть возможность превратиться в жидкость, — **паром**.

Свойства насыщенного и ненасыщенного пара различны.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Состояние насыщенного пара, как показывает опыт, приближённо описывается уравнением состояния идеального газа (10.4), а его давление определяется формулой

$$p_{н.\,п} = nkT. \qquad (11.1)$$

С ростом температуры давление растёт.

Важно Так как давление насыщенного пара не зависит от объёма, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Однако зависимость давления $p_{н.\,п}$ от температуры T, найденная экспериментально, не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объёме. С увеличением температуры давление реального насыщенного пара растёт быстрее, чем давление идеального газа (рис. 11.2, участок кривой AB). Это становится очевидным, если провести изохоры идеального газа через точки A и B (штриховые прямые). Почему это происходит?

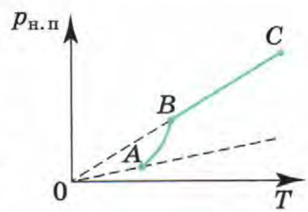


Рис. 11.2

При нагревании жидкости в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар. В результате согласно формуле (11.1)

Важно давление насыщенного пара растёт не только вследствие повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара.

В основном увеличение давления при повышении температуры определяется именно увеличением концентрации. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что

Важно при изменении температуры пара в закрытом сосуде (или при изменении объёма при постоянной температуре) изменяется масса пара.

Почему составляются таблицы зависимости давления насыщенного пара от температуры и нет таблиц зависимости давления газа от температуры?

Жидкость частично превращается в пар, или, напротив, пар частично конденсируется. С идеальным газом ничего подобного не происходит.

Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании перестанет быть насыщенным и его давление при постоянном объёме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре (см. рис. 11.2, участок кривой *BC*).

Кипение. По мере увеличения температуры жидкости интенсивность испарения увеличивается. Наконец, жидкость начинает кипеть. При кипении по всему объёму жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают на поверхность.

Запомни **Кипение** — это процесс парообразования, происходящий по всему объёму жидкости при температуре кипения.

Понаблюдайте внимательно за процессом нагрева, закипания и кипения воды в чайнике. Вы обнаружите, что перед закипанием чайник почти перестаёт шуметь.

При каких условиях начинается кипение?

На что расходуется при кипении подводимое к жидкости тепло с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

Температура кипения жидкости остаётся постоянной. Это происходит потому, что вся подводимая к жидкости энергия расходуется на превращение её в пар.

В жидкости всегда присутствуют растворённые газы, выделяющиеся на дне и стенках сосуда, а также на взвешенных в жидкости пылинках, которые являются центрами парообразования. Пары жидкости, находящиеся внутри пузырьков, являются насыщенными. С увеличением температуры давление насыщенных паров возрастает и пузырьки увеличиваются в размерах. Под действием выталкивающей силы они всплывают вверх. Если верхние слои жидкости имеют более низкую температуру, то в этих слоях происходит конденсация пара в пузырьках. Давление стремительно падает, и пузырьки захлопываются. Захлопывание происходит настолько быстро, что стенки пузырька, сталкиваясь, производят нечто вроде взрыва. Множество таких микровзрывов создаёт характерный шум. Когда жидкость достаточно прогреется, пузырьки перестанут захлопываться и всплывут на поверхность. Жидкость закипит.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры объясняет, почему температура кипения жидкости зависит от давления на её поверхность. Пузырёк пара может расти, когда давление насыщенного пара внутри его немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из давления воздуха на поверхность жидкости (внешнее давление) и гидростатического давления столба жидкости.

Обратим внимание на то, что

Важно испарение жидкости происходит и при температурах, меньших температуры кипения, но только с поверхности жидкости, при кипении же образование пара происходит по всему объёму жидкости.

Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается и становится чуть больше давления в жидкости.

Важно Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения.

Так, в паровом котле при давлении, достигающем $1{,}6 \cdot 10^6$ Па, вода не кипит и при температуре 200 °С. В медицинских учреждениях в герметически закрытых сосудах — автоклавах (рис. 11.3) кипение воды также происходит при повышенном давлении. Поэтому температура кипения жидкости значительно выше 100 °С. Автоклавы применяют, например, для стерилизации хирургических инструментов, ускорения приготовления пищи (скороварка), консервации пищи, проведения химических реакций.

И наоборот,

Важно уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения.

Откачивая насосом воздух и пары воды из колбы, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре. При подъёме в горы атмосферное давление уменьшается, поэтому уменьшается температура кипения. На высоте 7134 м (пик Ленина на Памире) давление приближённо равно $4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.). Вода кипит там примерно при 70 °С. Сварить мясо в этих условиях невозможно.

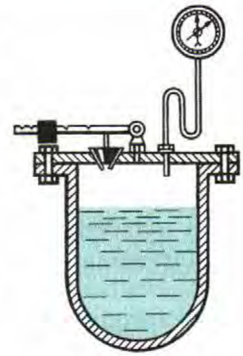


Рис. 11.3

У каждой жидкости своя температура кипения, которая зависит от свойств жидкости. При одной и той же температуре давление насыщенного пара разных жидкостей различно.

Например, при температуре 100 °С давление насыщенных паров воды равно 101 325 Па (760 мм рт. ст.), а паров ртути — всего лишь 117 Па (0,88 мм рт. ст.). Так как кипение происходит при той же температуре, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению, то вода при 100 °С закипает, а ртуть нет. Кипит ртуть при температуре 357 °С при нормальном давлении.

Различаются ли значения удельной теплоты испарения и удельной теплоты парообразования?

Давление насыщенного пара. Критическая температура Найти

1. Почему давление насыщенного пара не зависит от его объёма?
2. Почему температура кипения возрастает с увеличением давления?
3. Почему для кипения существенно повышение давления насыщенного пара в пузырьках, а не повышение давления имеющегося в них воздуха?
4. Как заставить закипеть жидкость, охлаждая сосуд? (Вопрос этот непростой.)

§ 70 ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Вспомните, что такое пар и каковы его основные свойства.
Можно ли считать воздух газом?
Применимы ли законы идеального газа для воздуха?

Интересно Вода занимает около 70,8 % поверхности земного шара. Живые организмы содержат от 50 до 99,7 % воды. Образно говоря, живые организмы — это одушевлённая вода. В атмосфере находится около 13—15 тыс. км^3 воды в виде капель, кристаллов снега и водяного пара. Атмосферный водяной пар влияет на погоду и климат Земли.

Водяной пар в атмосфере. Водяной пар в воздухе, несмотря на огромные поверхности океанов, морей, озёр и рек, далеко не всегда является насыщенным. Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты в данный момент испарение воды преобладает над конденсацией, а в других, наоборот, преобладает конденсация. Но в воздухе практически всегда имеется некоторое количество водяного пара.

Содержание водяного пара в воздухе, т. е. его влажность, можно характеризовать несколькими величинами.

Запомни Плотность водяного пара в воздухе называется **абсолютной влажностью.**

Абсолютная влажность выражается, следовательно, в килограммах на метр кубический (кг/м^3).

Парциальное давление водяного пара. Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, производимое воздухом на находящиеся в нём тела.

Запомни Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют **парциальным давлением водяного пара.**

Парциальное давление водяного пара принимают за один из показателей влажности воздуха. Его выражают в единицах давления — паскалях или миллиметрах ртутного столба.

Так как воздух представляет собой смесь газов, то атмосферное давление определяется суммой парциальных давлений всех компонент сухого воздуха (кислорода, азота, углекислого газа и т. д.) и водяного пара.

Подумайте, что определяет парциальное давление одного из компонент смеси газов в данном сосуде.

Относительная влажность. По парциальному давлению водяного пара и абсолютной влажности ещё нельзя судить о том, насколько водяной пар в данных условиях близок к насыщению. А именно от этого зависит интенсивность испарения воды и потеря влаги живыми организмами. Вот почему вводят величину, показывающую, насколько водяной пар при данной температуре близок к насыщению, — *относительную влажность.*

Запомни **Относительной влажностью воздуха** называют отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению $p_{н.\,п}$ насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.\,п}} \cdot 100\ \%. \qquad (11.2)$$

Относительная влажность воздуха обычно меньше 100 %.

При понижении температуры парциальное давление паров воды в воздухе может стать равным давлению насыщенного пара. Пар начинает конденсироваться, и выпадает роса.

Запомни Температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**.

По точке росы можно определить относительную влажность воздуха.

Психрометр. Влажность воздуха измеряют с помощью специальных приборов. Мы расскажем об одном из них — *психрометре*.

Психрометр состоит из двух термометров (рис. 11.4). Резервуар одного из них остаётся сухим, и он показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружён полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряется, и благодаря этому термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идёт испарение и температура, показываемая термометром, окружённым влажной тканью, ближе к температуре, показываемой сухим термометром.

При относительной влажности, равной 100 %, вода вообще не будет испаряться и показания обоих термометров будут одинаковы. По разности температур этих термометров с помощью специальных таблиц можно определить влажность воздуха.

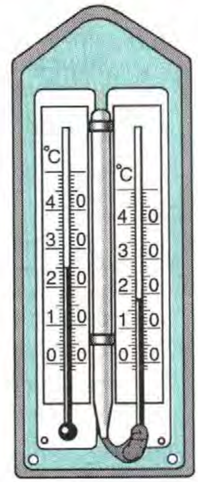


Рис. 11.4

Значение влажности. От влажности зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи человека. А испарение влаги имеет большое значение для поддержания температуры тела постоянной. В космических кораблях поддерживается наиболее благоприятная для человека относительная влажность воздуха (40—60 %).

Очень важно знать влажность в метеорологии — в связи с предсказанием погоды. Хотя относительное количество водяного пара в атмосфере сравнительно невелико (около

Как вы думаете, при каких условиях выпадает роса? Почему перед дождливым днём вечером на траве нет росы?

Повесьте в классной комнате психрометр и понаблюдайте за изменением влажности. Постройте график изменения влажности на протяжении учебного дня. Объясните, чем определяется это изменение.

1 %), роль его в атмосферных явлениях значительна. Конденсация водяного пара приводит к образованию облаков и последующему выпадению осадков. При этом выделяется большое количество теплоты. И наоборот, испарение воды сопровождается поглощением теплоты.

В ткацком, кондитерском и других производствах для нормального течения процесса необходима определённая влажность.

Очень важно соблюдение режима влажности на производстве при изготовлении электронных схем и приборов, в нанотехнологии.

Хранение произведений искусства и книг требует поддержания влажности воздуха на необходимом уровне. При большой влажности холсты на стенах могут провиснуть, что приведёт к повреждению красочного слоя. Поэтому в музеях на стенах вы можете видеть психрометры.

Влажность воздуха. Парциальное давление пара. Психрометр — Найти

1. Что называется относительной влажностью воздуха?
2. Определяется ли разность показаний термометров психрометра только относительной влажностью или, кроме того, зависит от конструкции прибора?
3. Почему при высокой влажности в жаркий день ухудшается самочувствие людей?
4. Какой процесс лежит в основе образования облаков и тумана?

А1. Парциальное давление водяного пара в воздухе при 20 °С равно 699 Па, а давление насыщенных паров при этой температуре равно 2330 Па. Относительная влажность воздуха равна

1) 10 % 2) 20 % 3) 30 % 4) 40 %

А2. Парциальное давление водяного пара в комнате в 2,5 раза меньше давления насыщенного водяного пара при такой же температуре. Следовательно, относительная влажность воздуха в комнате равна

1) 2,5 % 2) 4 % 3) 25 % 4) 40 %

А3. Давление насыщенного водяного пара при температуре 40 °С приблизительно равно 6000 Па. Чему равно парциальное давление водяного пара в комнате при этой температуре, если относительная влажность равна 30 %?

1) 1800 Па 2) 3000 Па 3) 12 000 Па 4) 20 000 Па

А4. В одном кубическом метре воздуха в комнате при температуре 24 °С находится водяной пар массой $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ кг. Определите относительную влажность воздуха в комнате, если плотность насыщенных паров при данной температуре $2{,}18 \cdot 10^{-2}$ кг/м^3.

1) 100 % 2) 73 % 3) 67 % 4) 53 %

А5. Относительная влажность воздуха в сосуде под поршнем равна 45 %. Воздух изотермически сжали, уменьшив объём в 3 раза. Чему стала равна относительная влажность воздуха в сосуде?

1) 135 % 2) 100 % 3) 90 % 4) 15 %

§ 71 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «НАСЫЩЕННЫЙ ПАР. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА»

При решении задач надо иметь в виду, что давление и плотность насыщенного пара не зависят от его объёма, а зависят только от температуры. Уравнение состояния идеального газа приближённо применимо и для описания насыщенного пара. Но при сжатии или нагревании насыщенного пара его масса не остаётся постоянной.

При решении некоторых задач могут понадобиться значения давления насыщенного пара при некоторых температурах. Эти данные нужно брать из таблицы.

Задача 1. Закрытый сосуд объёмом $V_1 = 0{,}5$ м^3 содержит воду массой $m = 0{,}5$ кг. Сосуд нагрели до температуры $t = 147$ °C. На сколько следует изменить объём сосуда, чтобы в нём содержался только насыщенный пар? Давление насыщенного пара $p_{\text{н. п}}$ при температуре $t = 147$ °C равно $4{,}7 \cdot 10^5$ Па.

Р е ш е н и е. Насыщенный пар при давлении $p_{\text{н. п}}$ занимает объём, равный $V = \dfrac{mRT}{p_{\text{н. п}}M} \approx 0{,}2\,\text{м}^3$, где $M = 0{,}018$ кг/моль — молярная масса воды. Объём сосуда $V_1 > V$, а значит, пар не является насыщенным. Для того чтобы пар стал насыщенным, объём сосуда следует уменьшить на

$$\Delta V = V_1 - V = V_1 - \frac{mRT}{p_{\text{н. п}}M} = 0{,}3\,\text{м}^3.$$

Задача 2. Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде при температуре $t_1 = 5$ °C равна $\varphi_1 = 84\,\%$, а при температуре $t_2 = 22$ °C равна $\varphi_2 = 30\,\%$. Во сколько раз давление насыщенного пара воды при температуре t_2 больше, чем при температуре t_1?

Р е ш е н и е. Давление водяного пара в сосуде при $T_1 = 278$ К равно $p_1 = \dfrac{\varphi_1}{100\,\%}p_{\text{н. п1}}$, где $p_{\text{н. п1}}$ — давление насыщенного пара при температуре T_1. При температуре $T_2 = 295$ К давление $p_2 = \dfrac{\varphi_2}{100\,\%}p_{\text{н. п2}}$.

Так как объём постоянен, то по закону Шарля $\dfrac{p_1}{p_2} = \dfrac{T_1}{T_2}$.

Отсюда $\dfrac{p_{\text{н. п2}}}{p_{\text{н. п1}}} = \dfrac{\varphi_1}{\varphi_2}\dfrac{T_2}{T_1} \approx 3$.

Задача 3. В комнате объёмом 40 м^3 температура воздуха 20 °C, его относительная влажность $\varphi_1 = 20\,\%$. Сколько надо испарить воды, чтобы относительная влажность φ_2 достигла 50 %? Известно, что при 20 °C давление насыщающих паров $p_{\text{н. п}} = 2330$ Па.

Р е ш е н и е. Относительная влажность $\varphi_1 = \dfrac{p_{\text{п1}}}{p_{\text{н. п}}}100\,\%$ отсюда

$$\varphi_1 = \frac{p_{\text{п1}}}{p_{\text{н. п}}}100\,\%, \quad \varphi_2 = \frac{p_{\text{п2}}}{p_{\text{н. п}}}100\,\%.$$

Давление пара при относительной влажности φ_1 и φ_2

$$p_{\text{п}1} = \frac{\varphi_1 p_{\text{н. п}}}{100\ \%}, \quad p_{\text{п}2} = \frac{\varphi_2 p_{\text{н. п}}}{100\ \%}.$$

Плотность связана с давлением равенством $\rho = Mp/RT$, откуда

$$\rho_1 = \frac{Mp_{\text{п}1}}{RT}, \quad \rho_2 = \frac{Mp_{\text{п}2}}{RT}.$$

Массы воды в комнате при влажности φ_1 и φ_2

$$m_1 = \rho_1 V = \frac{Mp_{\text{п}1}}{RT}V, \quad m_2 = \rho_2 V = \frac{Mp_{\text{п}2}}{RT}V.$$

Масса воды, которую надо испарить:

$$m = m_2 - m_1 = \frac{MV}{RT}(p_{\text{п}2} - p_{\text{п}1}) = \frac{Mp_{\text{н. п}}V}{RT\,100\ \%}(\varphi_2 - \varphi_1) = 0{,}208\ \text{кг}.$$

Задача 4. В комнате с закрытыми окнами при температуре 15 °С относительная влажность $\varphi_1 = 10\ \%$. Чему станет равна относительная влажность, если температура в комнате повысится на 10 °С? Давление насыщенного пара при 15 °С $p_{\text{н.п}1} = 12{,}8$ мм рт. ст., а при 25 °С $p_{\text{н.п}2} = 23{,}8$ мм рт. ст.

Решение. Так как пар ненасыщенный, то парциальное давление пара изменяется по закону Шарля $p_1/T_1 = p_2/T_2$. Из этого уравнения можно определить давление ненасыщенного пара p_2 при T_2: $p_2 = p_1T_2/T_1$. Относительная влажность при T_1 равна:

$$\varphi_1 = \frac{p_1}{p_{\text{н. п}1}}100\ \%. \tag{1}$$

Относительная влажность при $T_2 = 25$ °С равна:

$$\varphi_2 = \frac{p_2}{p_{\text{н. п}2}}100\ \% = \frac{p_1T_2}{p_{\text{н. п}2}T_1}100\ \%. \tag{2}$$

Из уравнения (1) получим $p_1 = \dfrac{\varphi_1 p_{\text{н. п}1}}{100\ \%}$, следовательно, $\varphi_2 = \dfrac{\varphi_1 p_{\text{н. п}1}T_2}{p_{\text{н. п}2}T_1} = 5{,}6\ \%$.

Задача 5. Относительная влажность воздуха в помещении 60 %, температура 18 °С. До какой температуры надо охладить металлический предмет, чтобы его поверхность запотела?

Решение. Относительная влажность воздуха $\varphi = (p/p_{\text{н. п}})100\ \%$.

Для конденсации пара необходимо, чтобы он стал насыщенным, т. е. температура достигла точки росы. Давление пара при 18 °С должно стать равным давлению насыщенного пара при искомой температуре:

$$p = \frac{\varphi p_{\text{н. п}}}{100\ \%} = 1{,}24 \cdot 10^4\ \text{Па}.$$

Давление насыщенного пара $p_{\text{н. п}} = 1{,}23 \cdot 10^4$ Па при температуре $t_2 = 10$ °С (определяем по таблице). Следовательно, $t_2 \approx 10$ °С.

Задачи для самостоятельного решения

1. Как будет меняться температура кипения воды, если сосуд с водой опускать в глубокую шахту?

2. Чему равна плотность пара в пузырьках, поднимающихся к поверхности воды, кипящей при атмосферном давлении?

3. На улице моросит холодный осенний дождь. В комнате развешано выстиранное бельё. Высохнет ли бельё быстрее, если открыть форточку?

4. При температуре $t = 20$ °C относительная влажность в комнате $\varphi_1 = 20\,\%$. Определите массу воды, которую нужно испарить для увеличения влажности до $\varphi_2 = 50\,\%$, если объём комнаты $V = 40$ м^3. Плотность насыщенного пара воды при температуре $t = 20$ °C равна $\rho_{н.п} = 1{,}73 \cdot 10^{-2}$ кг/м^3.

5. Смешали воздух объёмом 5 м^3 и относительной влажностью 22 % при температуре 15 °C с воздухом с относительной влажностью 46 % при температуре 28 °C. Определите относительную влажность смеси, если её объём 8 м^3.

6. Температура воздуха вечером была 18 °C, относительная влажность 65 %. Ночью температура воздуха понизилась до 9 °C. Выпала ли роса? Если выпала, то сколько водяного пара конденсировалось из воздуха объёмом 1 м^3? При 18 °C плотность насыщенного пара 15,4 г/м^3, при 9 °C — 8,8 г/м^3.

C1. Человек в очках вошёл с улицы в тёплую комнату и обнаружил, что его очки запотели. Какой должна быть температура на улице, чтобы наблюдалось это явление? В комнате температура воздуха 22 °C, а относительная влажность 50 %. Поясните, как вы получили ответ. (Для ответа на вопрос воспользуйтесь таблицей давления насыщенных паров воды.)

Давление насыщенных паров воды при различных температурах

t, °C	0	2	4	6	8	10	12	14
p, кПа	0,611	0,705	0,813	0,934	1,07	1,23	1,4	1,59

t, °C	16	18	20	22	24	26	28	30
p, кПа	1,81	2,06	2,19	2,64	2,99	3,17	4,24	7,37

ПОВТОРИТЕ МАТЕРИАЛ ГЛАВЫ 11 ПО СЛЕДУЮЩЕМУ ПЛАНУ:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

ГЛАВА 12 ТВЁРДЫЕ ТЕЛА

Мы живём на поверхности твёрдого тела — земного шара, в домах, построенных из твёрдых тел. Различные приборы, орудия труда сделаны из твёрдых тел. Знать свойства твёрдых тел необходимо.

§ 72 КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Вспомните, что такое твёрдое тело. Чем мы пренебрегали, когда в механике считали, что тело абсолютно твёрдое?
Каковы физические свойства твёрдых тел?
Какие физические величины характеризуют свойства твёрдых тел?

Твёрдые тела сохраняют не только свой объём, как жидкости, но и форму. Они находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

Запомни **Кристаллы** — это твёрдые тела, атомы или молекулы которых занимают определённые, упорядоченные положения в пространстве.

Поэтому кристаллы имеют плоские грани. Например, крупинка обычной поваренной соли имеет плоские грани, составляющие друг с другом прямые углы (рис. 12.1). Это можно заметить, рассматривая соль с помощью лупы. А как геометрически правильна форма снежинки! В ней также отражена геометрическая правильность внутреннего строения кристаллического твёрдого тела — льда (рис. 12.2).

Анизотропия кристаллов. Однако правильная внешняя форма не единственное и даже не самое главное следствие упорядоченного строения кристалла.

Рис. 12.1

Рис. 12.2

Важно Главное следствие упорядоченного строения — это зависимость физических свойств кристалла от выбранного в кристалле направления.

Запомни Зависимость физических свойств от направления внутри кристалла называют **анизотропией**.

Рис. 12.3

Прежде всего бросается в глаза различная механическая прочность кристаллов по разным направлениям. Например, кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки (рис. 12.3), но разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее. Так же легко расслаивается в одном направлении кристалл графита.

Это происходит потому, что кристаллическая решётка графита имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных сеток, состоящих из атомов углерода (рис. 12.4). Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями сравнительно велико — примерно в 2 раза больше, чем длина стороны шестиугольника, поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри их.

Интересно

Когда вы пишете карандашом, такое расслоение графита происходит непрерывно и его тонкие слои остаются на бумаге.

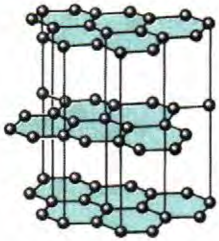


Рис. 12.4

Многие кристаллы по-разному проводят тепло и электрический ток в различных направлениях. От направления зависят и оптические свойства кристаллов.

Все кристаллические тела анизотропны.

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическую структуру имеют металлы.

Интересно

При падении света на кристалл кварца световой поток распадается на два потока, идущие в кристалле по разным направлениям. Это явление получило название двойного лучепреломления.

Если взять сравнительно большой кусок металла, то на первый взгляд его кристаллическое строение никак не проявляется ни во внешнем виде этого куска, ни в его физических свойствах. Металлы в обычном состоянии не обнаруживают анизотропии.

Дело здесь в том, что обычно металл состоит из огромного количества сросшихся друг с другом маленьких кристалликов. Под микроскопом или даже с помощью лупы их нетрудно рассмотреть, особенно на свежем изломе металла (рис. 12.5). Свойства каждого кристаллика зависят от направления, но кристаллики ориентированы по отношению друг к другу беспорядочно. В результате в объёме, значительно превышающем объём отдельных кристалликов, все направления внутри металлов равноправны и свойства металлов одинаковы по всем направлениям.

Рис. 12.5

Запомни Твёрдое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называют **поликристаллическим.** Одиночные кристаллы называют **монокристаллами.**

Растворите в стакане с водой соль, сделайте концентрированный раствор. Опустите в насыщенный раствор несколько кристалликов соли и оставьте, пока вся вода не испарится. Посмотрите, что останется в стакане. Сделайте выводы.

В обычных условиях поликристаллическое тело образуется в результате того, что начавшийся рост многих кристаллов продолжается до тех пор, пока они не приходят в соприкосновение друг с другом, образуя единое тело.

К поликристаллам относятся не только металлы. Кусок сахара, например, также имеет поликристаллическую структуру.

Интересно Соблюдая большие предосторожности, можно вырастить металлический кристалл больших размеров — монокристалл.

Мы говорили только о трёхмерных кристаллах. В 2004 г. был получен графен — двумерный кристалл, состоящий из одиночного слоя атомов углерода и имеющий идеальную гексагональную решётку (рис. 12.6). В 30-х годах прошлого века было доказано, что двумерные кристаллы неустойчивы и легко разрушаются.

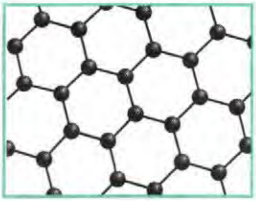


Рис. 12.6

Однако графен имеет волнообразную структуру, что определяет его устойчивость. Графен обладает уникальными свойствами — он прочен, имеет высокую проводимость и прозрачен. Из него можно собрать трёхмерный кристалл графита.

Интересно За «передовые опыты с двумерным материалом — графеном» Андрею Константиновичу Гейму и Константину Сергеевичу Новосёлову была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 год.

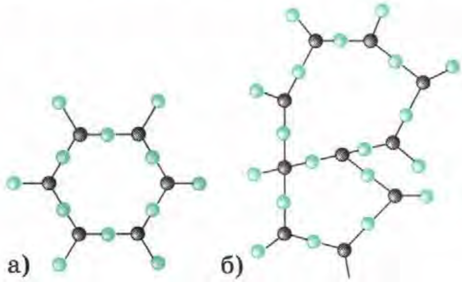


Рис. 12.7

Аморфные тела. Кроме твёрдых тел, имеющих кристаллическую структуру, которая характеризуется строгим порядком в расположении атомов, существуют аморфные твёрдые тела.

У аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы-соседи располагаются в некотором порядке. Но строгой повторяемости по всем направлениям одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет.

По расположению атомов и по их поведению аморфные тела аналогичны жидкостям. Часто одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Например, кварц SiO_2 может быть как в кристаллической, так и в аморфной форме (кремнезём). Кристаллическую форму кварца схематически можно представить в виде решётки из правильных шестиугольников (рис. 12.7, *а*). Аморфная структура кварца также имеет вид решётки, но неправильной формы. Наряду с шестиугольниками в ней встречаются пяти- и семиугольники (рис. 12.7, *б*).

Свойства аморфных тел.

Важно Все аморфные тела изотропны, т. е. их физические свойства одинаковы по всем направлениям.

Интересно Слово «аморфный» происходит от греческого слова morphos — форма и частицы а, имеющей смысл отрицания.

При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно упругие свойства, подобно твёрдым телам, и текучесть, подобно жидкости. Так, при кратковременных воздействиях (ударах) они ведут себя как твёрдые тела и при сильном ударе раскалываются на куски. Но при очень продолжительном воздействии аморфные тела текут.

Атомы или молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определённое время «оседлой жизни» — время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время у них весьма велико.

Интересно К аморфным телам относятся стекло, смола, канифоль, сахарный леденец и др.

Проследите за куском смолы, который лежит на твёрдой поверхности. Постепенно смола по ней растекается, и, чем выше температура смолы, тем быстрее это происходит.

Интересно Для вара при t = 20 °C время «оседлой жизни» примерно 0,1 с.

В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения равновесия в другое происходят сравнительно редко.

Аморфные тела при низких температурах по своим свойствам напоминают твёрдые тела. Текучестью они почти не обладают, но по мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства всё более и более приближаются к свойствам жидкостей. Это происходит потому, что с ростом температуры постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое.

Важно Определённой температуры плавления у аморфных тел, в отличие от кристаллических, нет.

Жидкие кристаллы. В природе встречаются вещества, обладающие одновременно основными свойствами кристалла и жидкости, а именно анизотропией и текучестью.

Запомни Состояние вещества, обладающего одновременно анизотропией и текучестью, называется **жидкокристаллическим.**

Жидкими кристаллами являются в основном органические вещества, молекулы которых имеют длинную нитевидную форму или форму плоских пластин.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда жидкий кристалл образуется нитевидными молекулами. Эти молекулы расположены параллельно друг другу, однако беспорядочно сдвинуты, т. е. порядок, в отличие от обычных кристаллов, существует только в одном направлении.

При тепловом движении центры этих молекул движутся хаотично, однако ориентация молекул не изменяется, и они остаются параллельны самим себе.

Важно Строгая ориентация молекул существует не во всём объёме кристалла, а в небольших областях, называемых **доменами**.

На границе доменов происходит преломление и отражение света, поэтому жидкие кристаллы непрозрачны. Однако в слое жидкого кристалла, помещённом между двумя тонкими пластинами, расстояния между которыми 0,01—0,1 мм, с параллельными углублениями 10—100 нм, все молекулы будут параллельны и кристалл станет прозрачным. Если на какие-то участки жидкого кристалла подать электрическое напряжение, то жидкокристаллическое состояние нарушается. Эти участки становятся непрозрачными и начинают светиться, а участки без напряжения остаются тёмными.

Интересно Явление свечения жидких кристаллов используется при создании жидкокристаллических экранов телевизоров. Сам экран состоит из огромного числа элементов, и электронная схема управления таким экраном чрезвычайно сложна.

Физика твёрдого тела. Теоретические исследования приводят к получению твёрдых тел, свойства которых совершенно необычны. Получить такие тела методом проб и ошибок было бы невозможно. Создание транзисторов, о которых пойдёт речь в дальнейшем, — яркий пример того, как понимание структуры твёрдых тел привело к революции во всей радиотехнике.

Получение материалов с заданными механическими, магнитными, электрическими и другими свойствами — одно из основных направлений современной физики твёрдого тела.

Кристаллы. Аморфные тела. Жидкие кристаллы — Найти

1. Все ли кристаллические тела анизотропны?
2. Древесина анизотропна. Является ли она кристаллическим телом?
3. Приведите примеры монокристаллических и поликристаллических тел, не упомянутых в тексте.
4. Чем отличаются аморфные тела от кристаллических?
5. Приведите примеры аморфных тел.
6. Возникла бы профессия стеклодува, если бы стекло было кристаллическим телом, а не аморфным?

Повторите материал главы 12 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите опыты, подтверждающие основные закономерности.

«Физика твёрдого тела»
1. Создание новых материалов по заданным свойствам.
2. Дефекты в кристаллах.
3. Жидкие кристаллы в технике.
4. Резина и её физические свойства. Полимеры и их использование.
5. Искусственные алмазы.

«Исследование условий роста кристаллов»

ГЛАВА 13 ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Тепловые явления можно описывать с помощью величин (макроскопических параметров), измеряемых такими приборами, как манометр и термометр. Эти приборы не реагируют на воздействие отдельных молекул. Теория тепловых процессов, в которой не учитывается молекулярное строение тел, называется *термодинамикой*. В термодинамике рассматриваются процессы с точки зрения превращения теплоты в другие виды энергии.

§ 73 ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Вспомните из курса физики основной школы, что такое внутренняя энергия. Какие способы изменения внутренней энергии вы знаете?

Термодинамика была создана в середине XIX в. после открытия закона сохранения энергии. В её основе лежит понятие *внутренняя энергия*. Само название «внутренняя» предполагает рассмотрение системы как ансамбля движущихся и взаимодействующих молекул. Остановимся на вопросе о том, какая связь существует между термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией.

Термодинамика и статистическая механика. Первой научной теорией тепловых процессов была не молекулярно-кинетическая теория, а термодинамика.

Интересно

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы. Это произошло в середине XIX в., задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание. Тогда же было доказано, что наряду с механической энергией макроскопические тела обладают ещё и энергией, заключённой внутри самих тел.

Сейчас в науке и технике при изучении тепловых явлений используется как термодинамика, так и молекулярно-кинетическая теория. В теоретической физике молекулярно-кинетическую теорию называют *статистической механикой*.

Важно Термодинамика и статистическая механика изучают различными методами одни и те же явления и взаимно дополняют друг друга.

Запомни **Термодинамической системой** называют совокупность взаимодействующих тел, обменивающихся энергией и веществом.

Главное содержание термодинамики состоит в двух основных её законах, касающихся преобразования энергии. Эти законы установлены опытным путём. Они справедливы для всех веществ независимо от их внутреннего строения.

Внутренняя энергия в молекулярно-кинетической теории. Основным понятием в термодинамике является понятие внутренней энергии.

Запомни **Внутренняя энергия тела** (системы) — это сумма кинетической энергии хаотичного теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.

Механическая энергия тела (системы) как целого не входит во внутреннюю энергию. Например, внутренняя энергия газов в двух одинаковых сосудах при равных условиях одинакова независимо от движения сосудов и их расположения относительно друг друга.

Вычислить внутреннюю энергию тела (или её изменение), учитывая движение отдельных молекул и их положения относительно друг друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул в макроскопических телах. Поэтому необходимо уметь определять значение внутренней энергии (или её изменение) в зависимости от макроскопических параметров, которые можно непосредственно измерить.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

Согласно модели молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, следовательно, потенциальная энергия их взаимодействия равна нулю. Вся внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией беспорядочного движения его молекул.

Для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа массой m нужно умножить среднюю кинетическую энергию одного атома на число атомов. Учитывая, что $kN_A = R$, получим формулу для внутренней энергии идеального газа:

$$\boxed{U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT.} \qquad (13.1)$$

Важно Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

Важно

Изменение внутренней энергии идеального газа $\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1)$,

т. е. определяется температурами начального и конечного состояний газа и не зависит от процесса.

Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, но коэффициент пропорциональности между U и T другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но ещё и вращаются и колеблются относительно своих положений равновесия. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного, вращательного и колебательного движений молекул. Следовательно, внутренняя энергия многоатомного газа больше энергии одноатомного газа при той же температуре.

Выведите выражение (13.1).

Зависимость внутренней энергии от макроскопических параметров. Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра — температуры.

Объясните, почему внутренняя энергия идеального газа не зависит от объёма.

У реальных газов, жидкостей и твёрдых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул *не равна нулю.* Правда, для газов она много меньше средней кинетической энергии молекул, но для твёрдых и жидких тел сравнима с ней.

Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул газа зависит от объёма вещества, так как при изменении объёма меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно,

Важно внутренняя энергия реального газа в термодинамике в общем случае зависит наряду с температурой T и от объёма V.

Значения макроскопических параметров (температуры T, объёма V и др.) однозначно определяют состояние тел. Поэтому они определяют и внутреннюю энергию макроскопических тел.

Подумайте, можно ли утверждать, что внутренняя энергия реального газа зависит от давления, основываясь на том, что давление можно выразить через температуру и объём газа.

Внутренняя энергия U макроскопических тел однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние этих тел: температурой и объёмом.

Внутренняя энергия реального и идеального газов Найти

1. Приведите примеры превращения механической энергии во внутреннюю и обратно в технике и быту.
2. От каких физических величин зависит внутренняя энергия тела?
3. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа?

А1. Внутренняя энергия идеального газа в герметично закрытом сосуде уменьшается при
1) его охлаждении
2) его нагревании
3) уменьшении потенциальной энергии сосуда
4) уменьшении кинетической энергии сосуда

А2. В каком тепловом процессе внутренняя энергия идеального газа постоянной массы **НЕ** изменяется при переходе его из одного состояния в другое?
1) в изобарном
2) в изохорном
3) в адиабатном
4) в изотермическом

А3. Как изменяется внутренняя энергия одноатомного идеального газа при повышении его абсолютной температуры в 2 раза?
1) увеличивается в 4 раза
2) увеличивается в 2 раза
3) уменьшается в 2 раза
4) уменьшается в 4 раза

§ 74 РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия? Как определяется работа в механике?

Работа в механике и термодинамике. В *механике* работа определяется как произведение модуля силы, модуля перемещения точки её приложения и косинуса угла между векторами силы и перемещения. При действии силы на движущееся тело работа этой силы равна изменению его кинетической энергии.

Работа в *термодинамике* определяется так же, как и в механике, но она равна не изменению кинетической энергии тела, а изменению его внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии при совершении работы. Почему при сжатии или расширении тела меняется его внутренняя энергия? Почему, в частности, нагревается воздух при накачивании велосипедной шины?

Причина изменения температуры газа в процессе его сжатия состоит в следующем:

Важно при упругих соударениях молекул газа с движущимся поршнем изменяется их кинетическая энергия.

Понаблюдайте за изменением температуры насоса при накачивании велосипедной камеры.

Интересно При сжатии или расширении меняется и средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул, так как при этом меняется среднее расстояние между молекулами.

Так, при движении навстречу молекулам газа поршень во время столкновений передаёт им часть своей механической энергии, в результате чего увеличивается внутренняя энергия газа и он нагревается. Поршень действует подобно футболисту, встречающему летящий на него мяч ударом ноги. Нога футболиста сообщает мячу скорость, значительно большую той, которой он обладал до удара.

И наоборот, если газ расширяется, то после столкновения с удаляющимся поршнем скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается. Так же действует и футболист, для того чтобы уменьшить скорость летящего мяча или остановить его, — нога футболиста движется от мяча, как бы уступая ему дорогу.

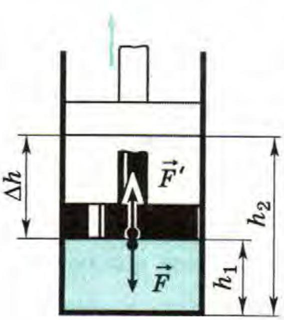


Рис. 13.1

Вычисление работы. Вычислим работу силы $\vec{F}$, действующей на газ со стороны внешнего тела (поршня), в зависимости от изменения объёма на примере газа в цилиндре под поршнем (рис. 13.1), при этом давление газа поддерживается постоянным. Сначала вычислим работу, которую совершает сила давления газа, действуя на поршень с силой $\vec{F}'$. Если поршень поднимается медленно и равномерно, то, согласно третьему закону Ньютона, $\vec{F} = \vec{F}'$. В этом случае газ расширяется изобарно.

Объясните, почему процесс расширения газа должен происходить очень медленно.

Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен $F' = pS$, где p — давление газа, а S — площадь поверхности поршня. При подъёме поршня на малое расстояние $\Delta h = h_2 - h_1$ работа газа равна:

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \quad (13.2)$$

Начальный объём, занимаемый газом, $V_1 = Sh_1$, а конечный $V_2 = Sh_2$. Поэтому можно выразить работу газа через изменение объёма $\Delta V = (V_2 - V_1)$:

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V > 0. \quad (13.3)$$

При расширении газ совершает положительную работу, так как направление силы и направление перемещения поршня совпадают.

Если газ сжимается, то формула (13.3) для работы газа остаётся справедливой. Но теперь $V_2 < V_1$, и поэтому $A < 0$.

Работа A, совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы A' самого газа только знаком:

$$\boxed{A = -A' = -p\Delta V.} \quad (13.4)$$

Обсудите с одноклассниками справедливость формулы (13.4). Может ли работа внешних сил быть больше или меньше работы силы давления газа?

При сжатии газа, когда $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, работа внешней силы оказывается положительной. Так и должно быть: при сжатии газа направления силы и перемещения точки её приложения совпадают.

Если давление не поддерживать постоянным, то при расширении газ теряет энергию и передаёт её окружающим телам: поднимающемуся поршню, воздуху и т. д. Газ при этом охлаждается. При сжатии газа, наоборот, внешние тела передают ему энергию и газ нагревается.

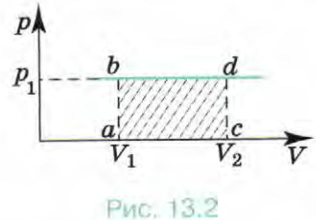


Рис. 13.2

Геометрическое истолкование работы. Работе A' газа для случая постоянного давления можно дать простое геометрическое истолкование.

При постоянном давлении график зависимости давления газа от занимаемого им объёма — прямая, параллельная оси абсцисс (рис. 13.2). Очевидно, что площадь прямоугольника $abdc$, ограниченная графиком $p_1 = \text{const}$, осью V и отрезками ab и cd, равными давлению газа, численно равна работе, определяемой формулой (13.3):

$$A' = p_1(V_2 - V_1) = |ab| \cdot |ac|.$$

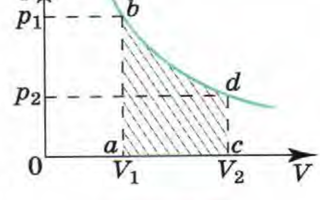


Рис. 13.3

В общем случае давление газа не остаётся неизменным. Например, при изотермическом процессе оно убывает обратно пропорционально объёму (рис. 13.3). В этом случае для вычисления работы нужно разделить общее изменение объёма на малые части и вычислить элементарные (малые) работы, а потом все их сложить. Работа газа по-прежнему численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости p от V, осью V и отрезками ab и cd, длина которых численно равна давлениям p_1, p_2 в начальном и конечном состояниях газа.

Объясните нагревание и охлаждение газа при изменении его объёма при постоянном давлении с точки зрения МКТ.

Работа газа при различных процессах — Найти

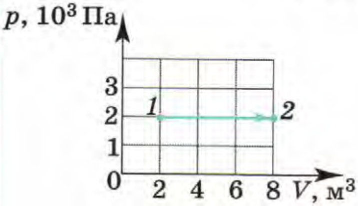
1. Почему газы при сжатии нагреваются?
2. Положительную или отрицательную работу совершают внешние силы при изотермическом процессе, изображённом на рисунке 13.3?

А1. Объём газа, расширяющегося при постоянном давлении 100 кПа, увеличился на 2 л. Работа, совершённая газом в этом процессе, равна

1) 2000 Дж 2) 20 000 Дж 3) 200 Дж 4) 50 МДж

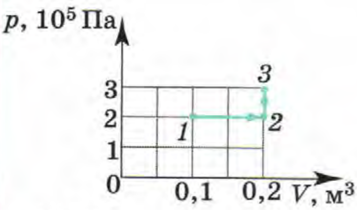
А2. Какая работа была совершена при изобарном сжатии водорода, взятого в количестве 6 моль, если его температура изменилась на 50 К?

1) 1 Дж 2) 69,25 Дж 3) 138,5 Дж 4) 2493 Дж



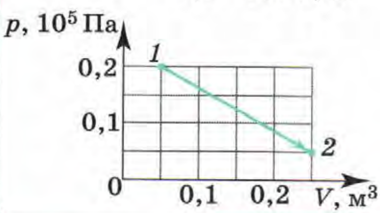
А3. Какая работа совершается газом при переходе его из состояния *1* в состояние *2* (см. рис.)?

1) 8 кДж
2) 12 кДж
3) 8 Дж
4) 6 Дж



А4. Какую работу совершает газ при переходе из состояния *1* в состояние *3* (см. рис.)?

1) 10 кДж
2) 20 кДж
3) 30 кДж
4) 40 кДж



А5. Какую работу совершил одноатомный газ в процессе, изображённом на рисунке в координатах p, V?

1) 2,5 кДж
2) 1,5 кДж
3) 3 кДж
4) 4 кДж

§ 75 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. РАБОТА»

Для решения задач нужно уметь вычислять внутреннюю энергию и работу, пользуясь формулами (13.1) и (13.4). Надо ещё иметь в виду, что величины A, Q, ΔU могут быть как положительными, так и отрицательными.

Задача 1. Аэростат объёмом $V = 500$ м^3 наполнен гелием под давлением $p = 10^5$ Па. В результате солнечного нагрева температура газа в аэростате поднялась от $t_1 = 10$ °C до $t_2 = 25$ °C. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

Решение. Гелий является одноатомным газом, поэтому его внутренняя энергия определяется формулой (13.1). При температуре T_1 эта энергия равна $U_1 = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT_1$, а при температуре T_2 равна $U_2 = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT_2$. Изменение энергии равно:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1).$$

Масса гелия неизвестна, но её можно выразить с помощью уравнения Менделеева—Клапейрона через начальную температуру, давление и объём газа: $\frac{mR}{M} = \frac{pV}{T_1}$. Подставляя значение $\frac{mR}{M}$ в уравнение для изменения энергии, получаем $\Delta U = \frac{3}{2}pV\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \approx 4 \cdot 10^6$ Дж.

Задача 2. В цилиндре под тяжёлым поршнем находится углекислый газ ($M = 0{,}044$ кг/моль) массой $m = 0{,}20$ кг. Газ нагревается на $\Delta T = 88$ К. Какую работу он при этом совершает?

Решение. Газ расширяется при некотором постоянном давлении p, которое создаётся атмосферой и поршнем. В этом случае работа газа $A' = p(V_2 - V_1)$, где V_1 и V_2 — начальный и конечный объёмы газа. Используя уравнение Менделеева—Клапейрона, выразим произведения pV_2 и pV_1 через $\frac{m}{M}RT_2$ и $\frac{m}{M}RT_1$. Тогда $A' = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1) \approx 3{,}3$ Дж.

Задача 3. Чему равна работа, совершённая газом в количестве 3 моль при сжатии, если температура увеличилась на 100 К? Потери тепла не учитывайте.

Решение. При сжатии внешняя сила совершает положительную работу, за счёт которой происходит изменение внутренней энергии и соответственно температуры газа, т. е. $A = \Delta U$. Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T.$$

Работа, совершённая силой давления газа:

$$A' = -\frac{3}{2}\nu R\Delta T \approx -1250 \text{ Дж}.$$

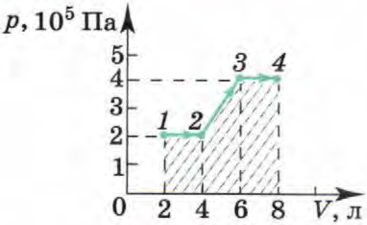


Рис. 13.4

Задача 4. На рисунке 13.4 показана зависимость давления газа от объёма при его переходе из состояния *1* в состояние *4*. Определите работу газа.

Решение. Работа газа численно равна площади заштрихованной фигуры. Процессы *1—2* и *3—4* изобарные, поэтому работа газа в этих процессах

$$A'_{1-2} = p_1(V_2 - V_1), \qquad A'_{3-4} = p_2(V_4 - V_3).$$

В процессе *2—3* изменяются все три параметра газа. Работа газа в этом процессе $A'_{2-3} = \dfrac{p_1 + p_2}{2}(V_3 - V_2)$.

Таким образом, учтя, что $V_2 - V_1 = V_3 - V_2 = V_4 - V_3 = \Delta V$, получим

$$A' = \left(p_1 + p_2 + \frac{p_1 + p_2}{2}\right)\Delta V = \frac{3}{2}(p_1 + p_2)\,\Delta V = 1800 \text{ Дж}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Как изменится внутренняя энергия одноатомного идеального газа, если его давление увеличится в 3 раза, а объём уменьшится в 2 раза?

2. Стержень отбойного молотка приводится в движение сжатым воздухом. Масса воздуха в цилиндре за время хода поршня меняется от 0,1 до 0,5 г. Считая давление воздуха в цилиндре и температуру (27 °C) постоянными, определите работу газа за один ход поршня ($M_{\text{возд}} = 0{,}029$ кг/моль).

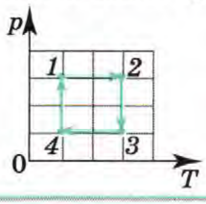
3. При изобарном расширении одноатомного газа, взятого в количестве 4 моль, его температура увеличилась на 100 °C. Определите изменение внутренней энергии и работу, совершённую силой давления газа.

C1. Объём идеального одноатомного газа, масса которого постоянна, увеличился при постоянном давлении 500 кПа на 0,03 м^3. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

C2. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде с жёсткими стенками объёмом 0,5 м^3. При нагревании его давление возросло на 4 кПа. На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

C3. Во время опыта объём воздуха в цилиндре, закрытом подвижным поршнем, и его абсолютную температуру увеличили в 2 раза. Оказалось, однако, что воздух мог просачиваться сквозь зазор вокруг поршня, и за время опыта его давление в цилиндре не изменилось. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия воздуха в цилиндре? (Воздух считайте идеальным газом.)

C4. В сосуде с небольшой трещиной находится газ, который может просачиваться сквозь трещину. Во время опыта давление газа уменьшилось в 8 раз, а его абсолютная температура уменьшилась в 4 раза при неизменном объёме. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия газа в сосуде? (Газ считайте идеальным.)



C5. В координатах p, T показан цикл тепловой машины, у которой рабочим телом является идеальный газ. На каком участке цикла работа газа наибольшая по модулю?

§ 76 КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Вспомните, какие агрегатные состояния вещества вы знаете.
Назовите процессы, при которых происходят агрегатные превращения вещества.
Как можно изменить агрегатное состояние вещества?

Изменить внутреннюю энергию любого тела можно, совершая работу, нагревая или, наоборот, охлаждая его. Так, при ковке металла совершается работа, и он разогревается, в то же время металл можно разогреть над горящим пламенем.

Рис. 13.5

Также если закрепить поршень (рис. 13.5), то объём газа при нагревании не меняется и работа не совершается. Но температура газа, а следовательно, и его внутренняя энергия возрастают.

Внутренняя энергия может увеличиваться и уменьшаться, поэтому количество теплоты может быть положительным и отрицательным.

Запомни Процесс передачи энергии от одного тела другому без совершения работы называют **теплообменом.**

Количественную меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют **количеством теплоты.**

Молекулярная картина теплообмена. При теплообмене на границе между телами происходит взаимодействие медленно движущихся молекул холодного тела с быстро движущимися молекулами горячего тела. В результате кинетические энергии молекул выравниваются и скорости молекул холодного тела увеличиваются, а горячего уменьшаются.

При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую, часть внутренней энергии более нагретого тела передаётся менее нагретому телу.

Количество теплоты и теплоёмкость. Вам уже известно, что для нагревания тела массой m от температуры t_1 до температуры t_2 необходимо передать ему количество теплоты:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t. \quad (13.5)$$

При остывании тела его конечная температура t_2 оказывается меньше начальной температуры t_1 и количество теплоты, отдаваемой телом, отрицательно.

Коэффициент c в формуле (13.5) называют *удельной теплоёмкостью* вещества.

Посмотрите таблицу значений теплоёмкостей различных веществ.
Сравните значения удельной теплоёмкости, например воды и железа.
Подумайте, почему теплоёмкости жидкостей больше, чем теплоёмкости твёрдых веществ.

Запомни **Удельная теплоёмкость** — это величина, численно равная количеству теплоты, которую получает или отдаёт вещество массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К.

Удельная теплоёмкость газов зависит от того, при каком процессе осуществляется теплопередача. Если нагревать газ при постоянном давлении, то он будет расширяться и совершать работу. Для нагревания газа на 1 °C при постоянном давлении ему нужно передать большее количество теплоты, чем для нагревания его при постоянном объёме, когда газ будет только нагреваться.

Жидкие и твёрдые тела расширяются при нагревании незначительно. Их удельные теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении мало различаются.

Удельная теплота парообразования. Для превращения жидкости в пар в процессе кипения необходима передача ей определённого количества теплоты. Температура жидкости при кипении не меняется. Превращение жидкости в пар при постоянной температуре не ведёт к увеличению кинетической энергии молекул, но сопровождается увеличением потенциальной энергии их взаимодействия. Ведь среднее расстояние между молекулами газа много больше, чем между молекулами жидкости.

Посмотрите кривую зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними (см. рис. 8.5) и убедитесь в справедливости данного утверждения.

Запомни Величину, численно равную количеству теплоты, необходимой для превращения при постоянной температуре жидкости массой 1 кг в пар, называют **удельной теплотой парообразования.**

Эту величину обозначают буквой r и выражают в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Интересно Процесс испарения жидкости происходит при любой температуре, при этом жидкость покидают самые быстрые молекулы, и она при испарении охлаждается. Удельная теплота испарения равна удельной теплоте парообразования.

Очень велика удельная теплота парообразования воды: $r_{H_2O} = 2{,}256 \cdot 10^6$ Дж/кг при температуре 100 °C. У других жидкостей, например у спирта, эфира, ртути, керосина, удельная теплота парообразования меньше в 3—10 раз, чем у воды.

Для превращения жидкости массой m в пар требуется количество теплоты, равное:

$$Q_п = rm. \qquad (13.6)$$

При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$Q_к = -rm. \qquad (13.7)$$

Удельная теплота плавления. При плавлении кристаллического тела всё подводимое к нему тепло идёт на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул. Кинетическая энергия молекул не меняется, так как плавление происходит при постоянной температуре.

Запомни Величину, численно равную количеству теплоты, необходимой для превращения кристаллического вещества массой 1 кг при температуре плавления в жидкость, называют **удельной теплотой плавления** и обозначают буквой λ.

При кристаллизации вещества массой 1 кг выделяется точно такое же количество теплоты, какое поглощается при плавлении.

Удельная теплота плавления льда довольно велика: $3{,}34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Интересно

«Если бы лёд не обладал большой теплотой плавления, то тогда весной вся масса льда должна была бы растаять в несколько минут или секунд, так как теплота непрерывно передаётся 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 или снега». Р. Блек, XVIII в.

Для того чтобы расплавить кристаллическое тело массой m, необходимо количество теплоты, равное:

$$Q_{пл} = \lambda m. \qquad (13.8)$$

Количество теплоты, выделяемой при кристаллизации тела, равно:

$$Q_{кр} = -\lambda m. \qquad (13.9)$$

Уравнение теплового баланса. Рассмотрим теплообмен внутри системы, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, например теплообмен между водой в сосуде и опущенным в воду горячим железным шариком. Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, отданной одним телом, численно равно количеству теплоты, полученной другим.

Отданное количество теплоты считается отрицательным, полученное количество теплоты — положительным. Поэтому суммарное количество теплоты $Q_1 + Q_2 = 0$.

Если в изолированной системе происходит теплообмен между несколькими телами, то

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... = 0. \qquad (13.10)$$

Запомни Уравнение (13.10) называется **уравнением теплового баланса.**

Здесь Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, полученной или отданной телами. Эти количества теплоты выражаются формулой (13.5) или формулами (13.6)—(13.9), если в процессе теплообмена происходят различные фазовые превращения вещества (плавление, кристаллизация, парообразование, конденсация).

Плавление. Кристаллизация. Парообразование. Конденсация — Найти

1. Что называют количеством теплоты?
2. От чего зависит удельная теплоёмкость вещества?
3. Что называют удельной теплотой парообразования?
4. Что называют удельной теплотой плавления?
5. В каких случаях количество теплоты — положительная величина, а в каких случаях отрицательная?
6. Как следует записать уравнение теплового баланса для изолированной системы из трёх тел, переходящей в равновесное состояние?

§ 77 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА»

Для решения задач нужно чётко выделять начальное и конечное состояния системы, а также характеризующие эти состояния параметры. Кроме этого, нужно уметь вычислять количество теплоты по формулам (13.5)—(13.9) и ещё помнить, что величина Q может быть как положительной, так и отрицательной.

Задача 1. В калориметре находится лёд массой 1 кг при температуре $t_1 = -40$ °С. В калориметр пускают пар массой 1 кг при температуре $t_2 = 120$ °С. Определите установившуюся температуру и фазовое состояние системы. Нагреванием калориметра пренебрегите. ($c_л = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $c_в = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $c_п = 2{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), $\lambda_л = 3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг, $r_п = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг.)

Решение. Прежде чем составлять уравнение теплового баланса, $|Q_{отд}| = Q_{пол}$, оценим, какое количество теплоты могут отдать одни элементы системы, а какое количество теплоты могут получить другие. Очевидно, что тепло отдают: пар 1) при охлаждении до 100 °С и 2) при конденсации; вода, сконденсировавшаяся из пара, при остывании от 100 °С. Тепло получают: лёд 1) при нагревании и 2) при плавлении; вода, полученная из льда, нагревается от 0 °С до какой-то температуры. Определим количество теплоты, отданной паром при процессах *1* и *2*:

$$|Q_{отд}| = c_п m_п (t_2 - 100) + r_п m_п = 23{,}0 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Количество теплоты, полученной льдом при процессах *1* и *2*:

$$Q_{пол} = c_л m_л (0 - t_1) + \lambda_л m_л = 4{,}14 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Из расчётов ясно, что $|Q_{отд}| > Q_{пол}$. Растаявший лёд затем нагревается. Определим, какое количество теплоты нужно дополнительно, чтобы вода, образовавшаяся из льда ($m_л = m_в$), нагрелась до 100 °С:

$$Q'_{пол} = c_в m_в (100 - 0) = 4{,}2 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Следовательно, суммарное количество теплоты, которую может получить лёд, перешедший в воду, которая затем нагрелась до 100 °С, есть $Q_{пол\Sigma} = 8{,}34 \cdot 10^5$ Дж. Мы видим, что $Q_{пол\Sigma} < |Q_{отд}|$.

Из последнего соотношения следует, что не весь пар будет конденсироваться. Массу оставшегося пара можно определить из соотношения $m'_п = (|Q_{отд}| - Q_{пол\Sigma})/r_п = 0{,}65$ кг.

Окончательно в калориметре будут находиться пар и вода при температуре $t = 100$ °С, при этом $m'_п = 0{,}65$ кг, $m_в = 1{,}35$ кг.

Задача 2. На сколько температура воды у основания водопада высотой 1200 м больше, чем у его вершины? На нагревание воды затрачивается 70 % выделившейся энергии. Удельная теплоёмкость воды $c_в = 4200$ Дж/(кг · К).

Решение. При ударе падающей воды у основания водопада часть потенциальной энергии $E_п = mgh$ идёт на нагревание воды: $\eta mgh = mc_в \Delta t$, откуда $\Delta t = \eta gh/c_в = 1{,}96$ °С.

Задача 3. Постройте график зависимости температуры в калориметре от времени, если количество теплоты, сообщаемой системе, постоянно и равно q = 100 Дж/с. В калориметре находился лёд массой 1 кг при t_1 = −20 °С.

Решение. Количество теплоты, необходимой для нагревания льда до t = 0 °С,

$$Q_1 = c_л m(0 - (-20))\ Дж = 4{,}2 \cdot 10^4\ Дж.$$

Промежуток времени, за который лёд нагреется до 0 °С, $\Delta t_1 = Q_1/q = 4{,}2 \cdot 10^2$ с = 0,12 ч.

Количество теплоты, необходимой для таяния льда,

$$Q_2 = \lambda m = 3{,}3 \cdot 10^5\ Дж.$$

Промежуток времени, за который лёд полностью растает, $\Delta t_2 = Q_2/q = 3{,}3 \cdot 10^3$ с ≈ 0,92 ч, t_2 = 1,04 ч.

Количество теплоты, необходимой для нагревания воды от 0 до 100 °С,

$$Q_3 = c_в m(100 - 0)\ Дж = 4{,}2 \cdot 10^5\ Дж.$$

Промежуток времени, за который произойдёт нагревание, $\Delta t_3 = Q_3/q = 4{,}2 \times 10^3$ с ≈ 1,2 ч, t_3 = 2,24 ч.

Для испарения воды требуется количество теплоты

$$Q_4 = rm = 2{,}26 \cdot 10^6\ Дж.$$

Промежуток времени, за который произойдёт полное испарение, $\Delta t_4 = 2{,}26 \cdot 10^4$ с ≈ 6,3 ч, t_4 = 8,54 ч.

Затем будет происходить нагревание пара. Количество теплоты, необходимой для нагревания пара до 120 °С,

$$Q_5 = c_п m(120 - 100)\ Дж = 4{,}4 \cdot 10^5\ Дж.$$

Промежуток времени, за который произойдёт нагревание пара, $\Delta t_5 = 4{,}4 \cdot 10^3$ с ≈ 1,2 ч, t_5 = 9,74 ч.

По полученным данным построен график зависимости t (°С) = $f(t)$ (рис. 13.6).

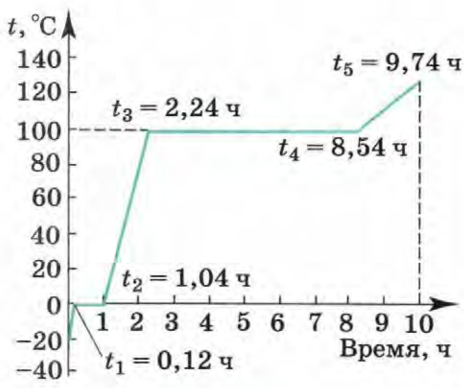


Рис. 13.6

Задачи для самостоятельного решения

1. В воду объёмом 1 л, температура которой 20 °С, бросают кусок железа массой 100 г, нагретый до 500 °С. При этом температура воды повышается до 24 °С и некоторое количество её обращается в пар. Определите массу обратившейся в пар воды.

2. К чайнику с кипящей водой подводится ежесекундно энергия, равная 1,13 кДж. Определите скорость истечения пара из носика чайника, площадь поперечного сечения которого равна 1 см^2. Плотность водяного пара считайте равной 1 кг/м^3.

3. Определите массу снега, который растает при температуре 0 °С под колёсами автомобиля, если автомобиль буксует в течение 20 с, а на буксовку идёт 50 % всей мощности? Мощность автомобиля $1{,}7 \cdot 10^4$ Вт, удельная теплота плавления льда $3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг.

4. Свинцовая пуля массой 0,01 кг, летящая горизонтально со скоростью 500 м/с, попадает в неподвижный стальной кубик массой 90 г, лежащий на гладком горизонтальном столе. Чему будет равна температура обоих тел после удара? Удар считайте абсолютно неупругим, температура пули в момент удара 30 °С, кубика — 20 °С. Потерями тепла можно пренебречь. Удельная теплоёмкость свинца 126 Дж/(кг · К), стали — 460 Дж/(кг · К).

5. Пар массой 1 кг при 100 °С выпускают в холодную воду массой 12 кг. Температура воды после конденсации в ней пара поднялась до 70 °С. Чему была равна первоначальная температура воды? Удельная теплота парообразования воды $22{,}6 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К).

6. С помощью механического молота массой 600 кг обрабатывается железная поковка массой 205 кг. За 35 ударов поковка нагрелась от 10 до 18 °С. Чему равна скорость молота в момент удара? Считайте, что на нагревание поковки затрачивается 70 % энергии молота. Удельная теплоёмкость железа 460 Дж/(кг · К).

7. В калориметре находится вода массой 0,4 кг при температуре 10 °С. В воду положили лёд массой 0,6 кг при температуре −40 °С. Какая температура установится в калориметре, если его теплоёмкость ничтожно мала?

8. Водород, взятый в количестве 1 моль, первоначально имевший температуру 0 °С, нагревается при постоянном давлении. Какое количество теплоты необходимо сообщить водороду, чтобы его объём удвоился?

9. Водород, объём которого 1 м^3, находится при 0 °С в цилиндрическом сосуде, закрытом сверху легко скользящим поршнем массой 1 т и площадью поперечного сечения 0,5 м^2. Атмосферное давление 97,3 кПа. Какое количество теплоты потребуется на нагревание водорода до 300 °С? Определите изменение его внутренней энергии.

С1. Воду массой 100 г при температуре 12 °С поместили в калориметр, где находился лёд при температуре −5 °С. После установления теплового равновесия температура льда повысилась до 0 °С, но масса льда не изменилась. Пренебрегая потерями тепла, оцените, чему была равна начальная масса льда в калориметре. Удельная теплоёмкость льда равна 2100 Дж/(кг · К), удельная теплоёмкость воды равна 4200 Дж/(кг · К).

С2. Для охлаждения лимонада массой 200 г в него бросают кубики льда при 0 °С. Масса каждого кубика 8 г. Первоначальная температура лимонада 30 °С. Сколько целых кубиков надо бросить в лимонад, чтобы установилась температура 15 °С? Тепловые потери не учитывайте. Удельная теплоёмкость лимонада такая же, как у воды. Удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К), удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг.

С3. В сосуд с водой опущена трубка. По трубке через воду пропускают пар при температуре 100 °С. Вначале масса воды увеличивается, но в некоторый момент, масса воды перестаёт увеличиваться, хотя пар по-прежнему пропускают. Первоначальная масса воды 230 г, а её первоначальная температура 0 °С. На сколько увеличилась масса воды? Удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг · К), удельная теплота парообразования воды 2300 кДж/кг.

С4. При какой скорости пуля из свинца полностью расплавится при ударе о стенку, если 80 % её энергии будет затрачено на нагревание пули? Начальная температура пули 27 °С, температура плавления свинца 327 °С, удельная теплоёмкость 130 Дж/(кг · К), удельная теплота плавления 25 кДж/кг.

§ 78 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Как формулируется закон сохранения полной механической энергии? При каких условиях внутренняя энергия сохраняется?

Первый закон термодинамики — это частный случай закона сохранения энергии, главного закона природы. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии.

Закон сохранения энергии. К середине XIX в. многочисленные опыты доказали, что

Важно механическая энергия никогда не пропадает бесследно.

Падает, например, молот на кусок свинца, и свинец нагревается. Силы трения тормозят тела, которые при этом разогреваются.

На основании множества подобных наблюдений и обобщения опытных фактов был сформулирован *закон сохранения энергии.*

Закон сохранения энергии

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Он всегда выполняется абсолютно точно, неизвестно ни одного случая, когда бы этот великий закон не выполнялся. Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким учёным, врачом по образованию Р. Майером (1814—1878), английским учёным Дж. Джоулем (1818—1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821—1894).

Как вы понимаете фразу «переход системы из одного состояния в другое»?

Первый закон термодинамики. Закон сохранения и превращения энергии, распространённый на тепловые явления, носит название *первого закона термодинамики.* В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не меняется, т. е. тела, изменение механической энергии которых много меньше изменения их внутренней энергии. Механическая энергия таких тел остаётся постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия каждого тела.

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась либо за счёт совершения работы, либо за счёт теплообмена с окружающими телами.

В *общем случае* при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счёт совершения работы, так и за счёт передачи теплоты. Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев.

Первый закон термодинамики

Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданной системе:

$$\Delta U = A + Q. \tag{13.11}$$

Интересно Систему, которая не обменивается с внешней средой ни энергией, ни веществом, называют изолированной.

Если система является изолированной, то работа внешних сил равна нулю ($A = 0$) и система не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$).

В этом случае согласно первому закону термодинамики

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0,$$

или

$$U_1 = U_2.$$

Важно Внутренняя энергия изолированной системы остаётся неизменной (сохраняется).

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A' системы над внешними телами. Учитывая, что $A' = -A$, первый закон термодинамики (13.11) можно записать так:

$$Q = \Delta U + A'. \qquad (13.12)$$

Количество теплоты, переданной системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Невозможность создания вечного двигателя. Из первого закона термодинамики следует невозможность создания вечного двигателя первого рода, т. е. устройства, способного совершать неограниченную работу без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло ($Q = 0$), то работа A' согласно уравнению (13.12) может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии:

$$A' = -\Delta U.$$

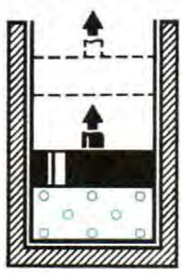
После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

Работа и количество теплоты — характеристики процесса изменения внутренней энергии. В данном состоянии система всегда обладает определённой внутренней энергией.

Но нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими *изменение внутренней энергии* системы в результате того или иного процесса.

Передаваемое тепло

Рис. 13.7



Теплоизолирующая оболочка

Рис. 13.8

Внутренняя энергия системы может измениться на одно и то же значение как за счёт совершения системой работы, так и за счёт передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы (рис. 13.7). Но он может потерять точно такое же количество энергии, поднимая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми (рис. 13.8).

Изменение внутренней энергии. Первый закон термодинамики Найти

1. Как формулируется первый закон термодинамики?
2. В каком случае изменение внутренней энергии отрицательно?
3. Почему можно говорить, что система обладает внутренней энергией, но нельзя сказать, что она обладает запасом определённого количества теплоты или работы?
4. Можно ли считать систему изолированной, если её температура остаётся постоянной?
5. Известно, что при изотермическом процессе идеальный газ совершил работу 2000 Дж. Чему равно количество теплоты, сообщённой системе?

A1. Идеальный газ получил количество теплоты, равное 300 Дж, и совершил работу, равную 100 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия газа?
1) увеличилась на 400 Дж
2) увеличилась на 200 Дж
3) уменьшилась на 400 Дж
4) уменьшилась на 200 Дж

A2. Идеальный газ совершил работу, равную 300 Дж. При этом его внутренняя энергия увеличилась на 300 Дж. В этом процессе газ
1) отдал 600 Дж
2) отдал 300 Дж
3) получил 600 Дж
4) получил 300 Дж

A3. В процессе эксперимента внутренняя энергия газа уменьшилась на 60 кДж, и он совершил работу 45 кДж. Следовательно, в результате теплообмена газ отдал окружающей среде количество теплоты, равное
1) 15 кДж 2) 45 кДж 3) 60 кДж 4) 105 кДж

A4. В процессе эксперимента газ получил от нагревателя количество теплоты, равное 3 кДж. При этом внутренняя энергия газа уменьшилась на 13 кДж. Следовательно, газ расширился, совершив работу
1) 3 кДж 2) 10 кДж 3) 13 кДж 4) 16 кДж

A5. Идеальный газ получил количество теплоты 100 Дж, и при этом внутренняя энергия газа уменьшилась на 100 Дж. Чему равна работа, совершённая внешними силами над газом?
1) 100 Дж 2) 200 Дж 3) –200 Дж 4) 0

§ 79 ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ

Перечислите известные вам изопроцессы, происходящие с газом.
Как записать первый закон термодинамики для различных процессов?

С помощью первого закона термодинамики можно делать важные заключения о характере протекающих процессов. Рассмотрим различные процессы, при которых одна из физических величин, характеризующих состояние газа, остаётся неизменной (изопроцессы). При этом газ будем считать идеальным.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объём газа не меняется, и поэтому работа газа равна нулю. Изменение внутренней энергии газа согласно уравнению (13.12) равно количеству переданной ему теплоты:

$$\Delta U = Q. \qquad (13.13)$$

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$, его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа $Q < 0$ и $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$, изменение внутренней энергии отрицательно и внутренняя энергия газа уменьшается.

Для одноатомного газа можно записать: $Q = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T$.

Удельная теплоёмкость газа при изохорном процессе $c_V = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{3}{2}\frac{R}{M}$.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе (T = const) внутренняя энергия идеального газа (см. формулу (13.1)) не меняется. Согласно формуле (13.12) всё переданное газу количество теплоты идёт на совершение работы:

$$Q = A'. \qquad (13.14)$$

Если газ получает тепло ($Q > 0$), то он совершает положительную работу ($A' > 0$). Если, напротив, газ отдаёт тепло окружающей среде (термостату), то $Q < 0$ и $A' < 0$. Работа же внешних сил над газом в последнем случае положительна.

Удельная теплоёмкость при изотермическом процессе стремится к бесконечности: $c_T \to \infty$.

Выведите выражение для количества теплоты через изменение температуры газа и удельную теплоёмкость газа (p = const).

Изобарный процесс. При изобарном процессе согласно формуле (13.12) передаваемое газу количество теплоты идёт на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении:

$$Q = \Delta U + A' = \Delta U + p\Delta V.$$

Адиабатный процесс. Газ может совершать работу и без сообщения ему теплоты.

Запомни Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется **адиабатным процессом**.

Так, если сосуд с газом теплоизолировать от окружающей среды и предоставить возможность газу расширяться, то сила давления газа будет совершать положительную работу.

Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, сообщенной системе (газу), идёт на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой механической работы. В данном случае системе теплота не сообщается и работа равна изменению внутренней энергии, взятому с обратным знаком:

$$A' = -\Delta U \ (Q = 0).$$

Если газ расширяется, то положительная работа совершается газом за счёт уменьшения внутренней энергии: $A' > 0$, $\Delta U < 0$. Внутренняя энергия газа является функцией температуры, следовательно, изменение температуры газа также отрицательно: $\Delta T < 0$. При адиабатном расширении газ охлаждается.

При сжатии газа, когда внешние силы совершают положительную работу, а соответственно газ — отрицательную, внутренняя энергия газа увеличивается: $A' < 0$, $\Delta U > 0$. При адиабатном сжатии газ нагревается.

Удельная теплоёмкость газа при адиабатном процессе равна нулю, так как $Q = 0$.

Интересно

Адиабатный процесс вы можете наблюдать, накачивая насосом велосипедную камеру, насос быстро нагревается.

На горлышке бутылки с охлаждённой газированной водой при открывании образуется облачко тумана. При адиабатном расширении уменьшается температура, что приводит к конденсации пара.

Распространение звуковых волн, при котором происходит сжатие и разрежение воздуха, также является адиабатным процессом.

Повышение температуры при адиабатном сжатии наблюдается в дизельных двигателях. В них отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо. К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется.

Адиабатный процесс может быть реализован и при отсутствии теплоизоляции. Если процесс расширения или сжатия газа происходит настолько быстро, что за время процесса не успевает произойти теплообмен с внешней средой, то такой процесс также можно считать адиабатным.

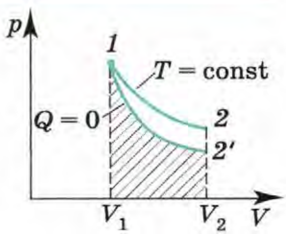


Рис. 13.9

На рисунке 13.9 показаны процессы расширения газа от объёма V_1 до объёма V_2 при изотермическом и адиабатном процессах. Мы видим, что начальное состояние газа одно и то же. Так как при адиабатном процессе происходит понижение температуры, то кривая зависимости давления от температуры идёт ниже изотермы.

Мы знаем, что работа газа может быть вычислена по площади фигуры, ограниченной графиком зависимости $p(V)$, осью V и отрезками, численно равными давлениям при начальном и конечном состояниях газа. Из рисунка видно, что работа при адиабатном расширении меньше, чем при таком же изотермическом расширении.

Понаблюдайте и подумайте, с какими ещё адиабатными процессами вы встречаетесь в повседневной жизни.

Начертите серию изотерм и серию адиабат в координатах p, V. Убедитесь, что у каждой адиабаты только одна точка пересечения с каждой изотермой.

Заметим, что адиабата пересекает изотермы, при этом точка пересечения адиабаты с определённой изотермой может быть только одна.

Первый закон термодинамики. Изопроцессы

Найти

1. В каком случае работа газа больше: при изотермическом расширении от объёма V_1 до объёма V_2 или при изобарном расширении от объёма V_1 до объёма V_2?
2. Как можно изменить температуру газа?
3. Какой из процессов является самым выгодным для получения максимальной механической работы при данном затраченном количестве теплоты?
4. Почему удельная теплоёмкость при постоянном давлении больше, чем удельная теплоёмкость при постоянном объёме?

А1. Идеальный газ переходит изотермически из одного состояния в другое. При увеличении объёма газа
1) ему сообщают некоторое количество теплоты
2) его внутренняя энергия возрастает
3) работа, совершённая внешними телами, положительна
4) давление увеличивается

А2. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде с жёсткими стенками объёмом 0,6 м^3. При нагревании его внутренняя энергия увеличилась на 18 кДж. На сколько возросло давление газа?
1) 10 кПа 2) 20 кПа 3) 30 кПа 4) 40 кПа

А3. Идеальный одноатомный газ совершает переход из состояния *1* в состояние *2* изобарно. Количество теплоты, подведённой к системе в этом процессе, равно 225 кДж. При этом внутренняя энергия газа
1) увеличилась на 315 кДж
2) уменьшилась на 225 кДж
3) увеличилась на 135 кДж
4) уменьшилась на 90 кДж

В4. Установите соответствие между названием закона и формулой, соответствующей закону. К каждой позиции первого столбца подберите нужную позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

Название закона	Формула
А) Первый закон термодинамики для адиабатного процесса	1) $p = \frac{2}{3}n\overline{E}$
Б) Основное уравнение МКТ газов	2) $Q = \Delta U + A'$
	3) $\Delta U = \frac{2}{3}\frac{m}{M}R\Delta T$
	4) $\Delta U = -A'$

А)	Б)

§ 80 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ»

В большей части задач используется не общая форма первого закона термодинамики, а его различные частные формулировки, применимые к определённым процессам. Задачи на теплообмен в изолированной системе решаются с помощью уравнения теплового баланса (13.10).

При решении задач надо чётко выделять начальное и конечное состояния системы, а также характеризующие её параметры.

Задача 1. Во время расширения газа, вызванного его нагреванием, в цилиндре с площадью поперечного сечения $S = 200$ см^2 газу было передано количество теплоты $Q = 1{,}5 \cdot 10^5$ Дж, причём давление газа оставалось постоянным и равным $p = 2 \cdot 10^7$ Па. На сколько изменилась внутренняя энергия газа, если поршень передвинулся на расстояние $\Delta h = 30$ см?

Решение. Согласно первому закону термодинамики в форме (13.12) $Q = \Delta U + A'$, где $A' = pS\Delta h$ — работа, совершённая газом. Отсюда $\Delta U = Q - pS\Delta h = 30$ кДж.

Задача 2. Газ расширяется от объёма V_1 до объёма V_2 один раз изотермически, другой изобарно и третий адиабатно. При каком процессе газ совершает бо́льшую работу и при каком газу передаётся большее количество теплоты?

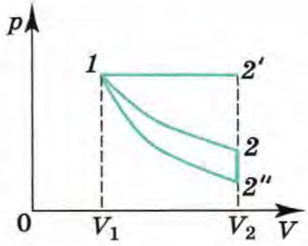


Рис. 13.10

Решение. На диаграмме p—V (рис. 13.10) изобразим все три процесса. Работа численно равна площади криволинейной трапеции. Из рисунка очевидно, что работа при изобарном процессе будет максимальной, при адиабатном минимальной, т. е. $A'_{1-2'} > A'_{1-2} > A'_{1-2''}$.

Температура газа в состоянии *2′* больше, чем в состоянии *2*, а температура в состоянии *2* больше, чем в состоянии *2″* ($T_{2'} > T_2 > T_{2''}$). В этом легко убедиться, начертив изотермы, проходящие через точки *2′* и *2″*. При процессе *1—2′* изменение внутренней энергии $\Delta U > 0$, при процессе *1—2* $\Delta U = 0$. Очевидно, что поскольку $Q = \Delta U + A'$ (первый закон термодинамики), то $Q_{1-2'} > Q_{1-2} > Q_{1-2''}$ ($Q_{1-2''} = 0$).

Задача 3. Пусть азот нагревается при постоянном давлении. Зная, что масса азота $m = 280$ г, количество затраченной теплоты $Q = 600$ Дж и удельная теплоёмкость азота при постоянном объёме $c_V = 745$ Дж/(кг · К), определите, на сколько повысилась температура азота. Молярная масса азота $M = 0{,}028$ кг/моль.

Решение. Согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A'$.
Изменение внутренней энергии $\Delta U = c_V m\Delta T$.
Работа при изобарном процессе $A' = p\Delta V = (m/M)R\Delta T$.
Следовательно, $Q = m\Delta T(c_V + R/M)$, откуда $\Delta T = \dfrac{Q}{m(c_V + R/M)} \approx 2{,}1$ К.

Задачи для самостоятельного решения

1. Для изобарного нагревания газа, взятого в количестве 800 моль, на 500 К газу сообщили количество теплоты $9{,}4 \cdot 10^6$ Дж. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии.

2. В цилиндрическом сосуде с площадью основания 250 см^2 находится азот массой 10 г, сжатый поршнем, на котором лежит гиря массой 12,5 кг. Какую работу совершит азот при нагревании его от 25 до 625 °С. На какую высоту при этом поднимется поршень? Атмосферное давление равно 1 атм.

3. Идеальный одноатомный газ в количестве 2 моль, находящийся при температуре 0 °С, сначала изохорно перевели в состояние, в котором давление в 2 раза больше первоначального, а затем изобарно в состояние, в котором объём в 2 раза больше первоначального. Определите изменение внутренней энергии газа.

4. В цилиндре под поршнем находится воздух. На его нагревание при постоянном давлении затрачено количество теплоты, равное 5 кДж. Определите работу, совершённую при этом воздухом. Теплоёмкость воздуха при постоянном давлении $c_p = 10^3$ Дж/(кг · К), молярная масса 29 г/моль.

5. Положительна или отрицательна работа газа в процессах *1—2*, *2—3* и *3—1* на рисунке 10.9? Получает газ тепло или отдаёт в этих процессах?

6. Какое количество теплоты необходимо для изохорного нагревания гелия массой 4 кг на 100 К?

7. Вычислите увеличение внутренней энергии водорода массой 2 кг при изобарном его нагревании на 10 К. (Удельная теплоёмкость водорода при постоянном давлении равна 14 кДж/(кг · К).)

8. В цилиндре компрессора сжимают идеальный одноатомный газ, количество вещества которого 4 моль. Определите, насколько поднялась температура газа за один ход поршня, если при этом была совершена работа 500 Дж. Процесс считайте адиабатным.

9. На одинаковые газовые горелки поставили два одинаковых плотно закупоренных сосуда вместимостью по 1 л. В одном сосуде находится вода, а в другом — воздух. Какой сосуд быстрее нагревается на 50 °С? Почему?

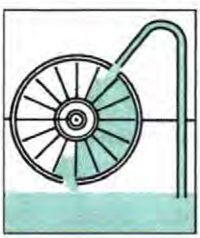


Рис. 13.11

10. Предложен следующий проект вечного двигателя (рис. 13.11). Закрытый сосуд разделён на две половинки герметичной перегородкой, сквозь которую пропущены трубка и водяная турбина в кожухе с двумя отверстиями. Давление воздуха в нижней части больше, чем в верхней. Вода поднимается по трубке и наполняет открытую камеру. В нижней части очередная порция воды выливается из камеры турбины, подошедшей к отверстию кожуха. Почему данная машина не будет работать вечно?

11. В вакууме закреплён горизонтальный цилиндр, в котором слева находится гелий в количестве 0,1 моль, запертый поршнем. Поршень массой 90 г удерживается упорами и может скользить влево вдоль стенок цилиндра без трения. В поршень попадает пуля массой 10 г, летящая горизонтально со скоростью 400 м/с, и застревает в нём. Как изменится температура гелия в момент остановки поршня в крайнем левом положении? Считайте, что газ не успевает обменяться теплом с поршнем и цилиндром.

§ 81 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Вспомните формулировку первого закона термодинамики.
Допускает ли первый закон термодинамики самопроизвольный переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому?
Наблюдаются ли такие процессы в природе?

Мы уже отмечали, что первый закон термодинамики — это частный случай закона сохранения энергии.

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых её превращениях остаётся неизменным. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности. Например, с точки зрения первого закона термодинамики в изолированной системе возможен переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому, если количество теплоты, полученной горячим телом, точно равно количеству теплоты, отданной холодным телом. В то же время наш опыт подсказывает, что это невозможно.

Важно Первый закон термодинамики не указывает направление процессов.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений, т. е. направление процессов, и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Этот закон был установлен путём непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий учёный Р. Клаузиус (1822—1888) сформулировал этот закон так:

Второй закон термодинамики

Невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах.

Здесь констатируется опытный факт определённой направленности теплопередачи: тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более тёплому, но эта передача связана с другими изменениями в окружающих телах: охлаждение достигается за счёт работы.

Важность этого закона в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе.

Как вы понимаете термин «направление процесса»?

Запомни **Необратимыми** называются такие процессы, которые могут самопроизвольно протекать лишь в одном определённом направлении; в обратном направлении они могут протекать только при внешнем воздействии.

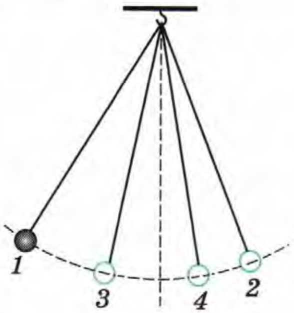


Рис. 13.12

Рассмотрим пример. Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис. 13.12; *1, 2, 3, 4* — последовательные положения маятника при максимальных отклонениях от положения равновесия). За счёт работы сил трения механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающего воздуха (а значит, и их внутренняя энергия) слегка повышается.

Можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

Важно Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот. При этом энергия упорядоченного движения тела как целого превращается в энергию неупорядоченного теплового движения составляющих его молекул.

Какие необратимые процессы вы наблюдаете в повседневной жизни?

Ещё один пример — процесс диффузии. Открыв пузырёк с духами, мы быстро почувствуем запах духов. Молекулы ароматического вещества благодаря тепловому движению проникают в пространство между молекулами воздуха. Трудно представить, чтобы все они вновь собрались в пузырьке.

Число подобных примеров можно увеличивать практически неограниченно. Все они говорят о том, что процессы в природе имеют определённую направленность, никак не отражённую в первом законе термодинамики.

Важно Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определённом направлении.

В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут. Все процессы в природе необратимы.

Раньше при рассмотрении процессов мы предполагали, что они являются обратимыми.

Запомни **Обратимый процесс** — это процесс, который можно провести в прямом и обратном направлениях через одни и те же промежуточные состояния без изменений в окружающих телах.

Обратимый процесс должен протекать очень медленно, чтобы каждое промежуточное состояние было равновесным.

Запомни **Равновесное состояние** — это состояние, при котором температура и давление во всех точках системы одинаковы.

Следовательно, чтобы система пришла в равновесное состояние, необходимо время.

При изучении изопроцессов мы предполагали, что переход из начального состояния в конечное проходит через равновесные состояния, и считали изотермический, изобарный и изохорный процессы обратимыми.

> Можно ли на графиках зависимости макропараметров газа изображать неравновесные состояния?

Идеальных обратимых процессов в природе не существует, однако реальные процессы можно с определённой степенью точности рассматривать как обратимые, что является очень важным для теории.

Интересно

Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. Такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме *второго закона термодинамики.*

Статистический характер второго закона термодинамики. Второй закон термодинамики определяет направление процессов в изолированной системе, однако этот закон носит статистический (вероятностный) характер.

Любое макросостояние системы, характеризующееся некоторыми макропараметрами, определяется его микросостояниями. Например, для газа давление и температура определяются числом молекул, их скоростью, распределением молекул по объёму сосуда. Если система предоставлена самой себе и она изолирована, то, как мы знаем, постепенно достигается равновесное состояние, при котором давление и температура во всех точках одинаковы. Процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное — необратимый процесс.

Равновесное состояние соответствует хаотичному движению молекул, т. е. система с точки зрения микросостояний приходит к полному хаосу. Хаотичное движение предполагает непрерывное перемещение молекул газа по объёму, обмен скоростями. Естественно, если мы сможем проследить за отдельными молекулами, то они в разные моменты времени оказываются в разных частях сосуда. Число молекул, находящихся в выделенном объёме, также может быть различным и т. д. В то же время макропараметры газа не меняются.

Движение молекул — это механическое движение, которое является обратимым. В то же время все необратимые процессы, такие, как теплообмен, происходят вследствие механического движения атомов и молекул, так как столкновения молекул обеспечивают передачу энергии. Итак, необратимые процессы являются следствием обратимого механического движения.

Чтобы соединить эти два неоспоримых факта, Л. Больцман использовал понятие вероятности. Так, состояние газа, при котором молекулы движутся хаотично, является наиболее вероятным, наиболее вероятным является и равномерное распределение молекул по объёму сосуда.

Однако возможно, что благодаря случайным перемещениям молекул все они окажутся в какой-то части сосуда, но вероятность такого состояния чрезвычайно мала.

Соответственно не противоречит законам природы даже такой процесс, в результате которого при случайном движении молекул воздуха все они соберутся в одной половине класса, а учащиеся в другой половине класса задохнутся. Но реально это событие никогда не происходило в прошлом и не произойдёт в будущем. Слишком мала вероятность подобного события, чтобы оно когда-либо случилось за всё время существования Вселенной в современном её состоянии — около нескольких миллиардов лет.

По приблизительным оценкам, эта вероятность примерно такого же порядка, как и вероятность того, что 20 000 обезьян, хаотично ударяя по клавишам пишущих машинок, напечатают без единой ошибки «Войну и мир» Л. Н. Толстого. В принципе это возможно, но реально никогда не произойдёт.

Границы применимости второго закона термодинамики. Вероятность обратных процессов перехода от равновесных состояний к неравновесным для макроскопических систем в целом очень мала. Но для малых объёмов, содержащих небольшое число молекул, вероятность отклонения от равновесия становится заметной.

Запомни Такие случайные отклонения системы от равновесия называются **флуктуациями.**

Именно флуктуациями плотности газа в областях порядка длины световой волны объясняются рассеяние света в атмосфере Земли и голубой цвет неба. Флуктуации давления в малых объёмах объясняют броуновское движение.

Наблюдение флуктуации служит важнейшим доказательством правильности созданной Больцманом статистической теории необратимости макропроцессов. *Второй закон термодинамики выполняется только для систем с огромным числом частиц.* В малых объёмах уже становятся существенными отклонения от этого закона.

Второй закон термодинамики. Обратимость процессов Найти

1. Какие процессы называются необратимыми? Назовите наиболее типичные необратимые процессы.
2. Как формулируется второй закон термодинамики?
3. Какое состояние газа является наиболее вероятным и соответствует равновесному состоянию?

§ 82 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (КПД) ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вспомните, что такое термодинамическая система и какими параметрами характеризуется её состояние.
Сформулируйте первый и второй законы термодинамики.

Интересно

Отметим, что именно создание теории тепловых двигателей привело к формулированию второго закона термодинамики.

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но для решения практических задач располагать запасами энергии ещё недостаточно. Необходимо так же уметь за счёт энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели — устройства, способные совершать работу. Бо́льшая часть двигателей на Земле — это *тепловые двигатели.*

Запомни

Тепловые двигатели — это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую работу.

Принцип действия тепловых двигателей. Для того чтобы двигатель совершал работу, необходима разность давлений по обе стороны поршня двигателя или лопастей турбины. Во всех тепловых двигателях эта разность давлений достигается за счёт повышения температуры *рабочего тела* (газа) на сотни или тысячи градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.

Одна из основных частей двигателя — сосуд, наполненный газом, с подвижным поршнем. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через T_1. Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют *температурой нагревателя.*

Роль холодильника. По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры T_2, которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Её называют *температурой холодильника.* Холодильником является атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара — *конденсаторы.* В последнем случае температура холодильника может быть немного ниже температуры окружающего воздуха.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть тепла неизбежно передаётся холодильнику (атмосфере) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин.

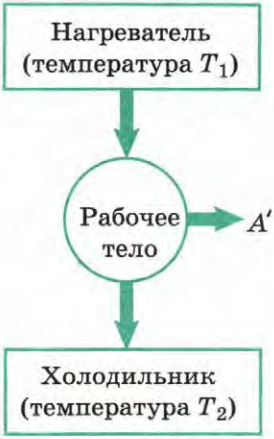


Рис. 13.13

Эта часть внутренней энергии топлива теряется. Тепловой двигатель совершает работу за счёт внутренней энергии рабочего тела. Причём в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильнику). Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 13.13.

Рабочее тело двигателя получает от нагревателя при сгорании топлива количество теплоты Q_1, совершает работу A' и передаёт холодильнику количество теплоты $Q_2 < Q_1$.

Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо рабочее тело вернуть в начальное состояние, при котором температура рабочего тела равна T_1. Отсюда следует, что работа двигателя происходит по периодически повторяющимся замкнутым процессам, или, как говорят, по циклу.

Запомни **Цикл** — это ряд процессов, в результате которых система возвращается в начальное состояние.

Предположите, при какой температуре рабочее тело (газ) следует возвращать в исходное состояние, чтобы работа за цикл была больше нуля.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя. Невозможность полного превращения внутренней энергии газа в работу тепловых двигателей обусловлена необратимостью процессов в природе. Если бы тепло могло самопроизвольно возвращаться от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в полезную работу с помощью любого теплового двигателя. Второй закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом:

Второй закон термодинамики невозможно создать вечный двигатель второго рода, т. е. двигатель, который полностью превращал бы теплоту в механическую работу.

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = Q_1 - |Q_2|, \qquad (13.15)$$

где Q_1 — количество теплоты, полученной от нагревателя, а Q_2 — количество теплоты, отданной холодильнику.

Запомни **Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя** называют отношение работы A', совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \qquad (13.16)$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику, то $\eta < 1$.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей. Законы термодинамики позволяют вычислить максимально возможный КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру T_1, и холодильником с температурой T_2, а также определить пути его повышения.

Интересно

Впервые максимально возможный КПД теплового двигателя вычислил французский инженер и учёный Сади Карно (1796—1832) в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824).

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Идеальная тепловая машина Карно работает по циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат, причём эти процессы считаются обратимыми (рис. 13.14). Сначала сосуд с газом приводят в контакт с нагревателем, газ изотермически расширяется, совершая положительную работу, при температуре T_1, при этом он получает количество теплоты Q_1.

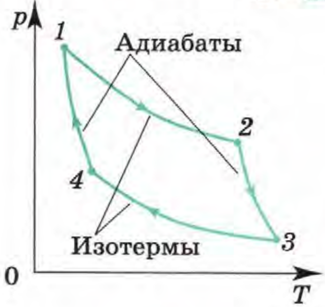


Рис. 13.14

Затем сосуд теплоизолируют, газ продолжает расширяться уже адиабатно, при этом его температура понижается до температуры холодильника T_2. После этого газ приводят в контакт с холодильником, при изотермическом сжатии он отдаёт холодильнику количество теплоты Q_2, сжимаясь до объёма $V_4 < V_1$. Затем сосуд снова теплоизолируют, газ сжимается адиабатно до объёма V_1 и возвращается в первоначальное состояние. Для КПД этой машины было получено следующее выражение:

Как вы думаете, почему для получения максимальной положительной работы С. Карно выбрал изотермический процесс?

$$\boxed{\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.} \qquad (13.17)$$

Как следует из формулы (13.17), КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Важно Главное значение этой формулы состоит в том, что в ней указан путь увеличения КПД, для этого надо повышать температуру нагревателя или понижать температуру холодильника.
Любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру T_1, и холодильником с температурой T_2, не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины: $\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \leqslant \frac{T_1 - T_2}{T_1}$. Процессы, из которых состоит цикл реальной тепловой машины, не являются обратимыми.

Формула (13.17) даёт теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем больше разность температур нагревателя и холодильника.

Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю, $\eta = 1$. Кроме этого доказано, что КПД, рассчитанный по формуле (13.17), не зависит от рабочего вещества.

Но температура холодильника, роль которого обычно играет атмосфера, практически не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твёрдое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.

Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счёт уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д.

Интересно Для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы: T_1 — 800 К и T_2 — 300 К. При этих температурах максимальное значение коэффициента полезного действия равно 62 % (отметим, что обычно КПД измеряют в процентах). Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь приблизительно равно 40 %. Максимальный КПД — около 44 % — имеют двигатели Дизеля.

Охрана окружающей среды. Трудно представить современный мир без тепловых двигателей. Именно они обеспечивают нам комфортную жизнь. Тепловые двигатели приводят в движение транспорт. Около 80 % электроэнергии, несмотря на наличие атомных станций, вырабатывается с помощью тепловых двигателей.

Однако при работе тепловых двигателей происходит неизбежное загрязнение окружающей среды. В этом заключается противоречие: с одной стороны, человечеству с каждым годом необходимо всё больше энергии, основная часть которой получается за счёт сгорания топлива, с другой стороны, процессы сгорания неизбежно сопровождаются загрязнением окружающей среды.

При сгорании топлива происходит уменьшение содержания кислорода в атмосфере. Кроме этого, сами продукты сгорания образуют химические соединения, вредные для живых организмов. Загрязнение происходит не только на земле, но и в воздухе, так как любой полёт самолёта сопровождается выбросами вредных примесей в атмосферу.

Одним из следствий работы двигателей является образование углекислого газа, который поглощает инфракрасное излучение поверхности Земли, что приводит к повышению температуры атмосферы. Это так называемый парниковый эффект. Измерения показывают, что температура атмосферы за год повышается на 0,05 °С. Такое непрерывное повышение температуры может вызвать таяние льдов, что, в свою очередь, приведёт к изменению уровня воды в океанах, т. е. к затоплению материков.

Отметим ещё один отрицательный момент при использовании тепловых двигателей. Так, иногда для охлаждения двигателей используется вода из рек и озёр. Нагретая вода затем возвращается обратно. Рост температуры в водоёмах нарушает природное равновесие, это явление называют тепловым загрязнением.

Для охраны окружающей среды широко используются различные очистительные фильтры, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ, совершенствуются конструкции двигателей. Идёт непрерывное усовершенствование топлива, дающего при сгорании меньше вредных веществ, а также технологии его сжигания. Активно разрабатываются альтернативные источники энергии, использующие ветер, солнечное излучение, энергию ядра. Уже выпускаются электромобили и автомобили, работающие на солнечной энергии.

Тепловой двигатель. КПД теплового двигателя

Найти

?

1. Какое устройство называют тепловым двигателем?
2. Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела в тепловом двигателе?
3. Что называется коэффициентом полезного действия двигателя?
4. Чему равно максимальное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя?

А1. Тепловая машина
1) совершает механическую работу по увеличению внутренней энергии тела
2) производит тепло
3) совершает механическую работу за счёт подводимого количества теплоты
4) производит электроэнергию за счёт совершения работы

А2. Рабочее тело тепловой машины получило количество теплоты, равное 70 кДж. При этом холодильнику передано количество теплоты, равное 52,5 кДж. КПД такой машины
1) 1,7 % 2) 17,5 % 3) 25 % 4) >100 %

А3. Чему равен коэффициент полезного действия паровой турбины, если полученное ею количество теплоты равно 1000 МДж, а полезная работа составляет 400 МДж?
1) 4 % 2) 25 % 3) 40 % 4) 60 %

А4. Тепловая машина за цикл получает от нагревателя 50 Дж и совершает полезную работу, равную 100 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?
1) 200 % 2) 67 % 3) 50 % 4) такая машина невозможна

А5. Горячий пар поступает в турбину при температуре 500 °С, а выходит из неё при температуре 30 °С. Чему равен КПД турбины? Паровую турбину считайте идеальной тепловой машиной.
1) 1 % 2) 61 % 3) 94 % 4) 100 %

§ 83 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «КПД ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»

Для решения задач надо воспользоваться известными выражениями для определения КПД тепловых машин и иметь в виду, что выражение (13.17) справедливо только для идеальной тепловой машины.

Задача 1. В котле паровой машины температура 160 °С, а температура холодильника 10 °С. Какую максимальную работу может теоретически совершить машина, если в топке, коэффициент полезного действия которой 60 %, сожжён уголь массой 200 кг с удельной теплотой сгорания $2{,}9 \cdot 10^7$ Дж/кг?

Решение. Максимальную работу может совершить идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, КПД которой $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$, где T_1 и T_2 — абсолютные температуры нагревателя и холодильника. Для любой тепловой машины КПД определяется по формуле $\eta = A/Q_1$, где A — работа, совершаемая тепловой машиной, Q_1 — количество теплоты, полученной машиной от нагревателя. Из условия задачи ясно, что Q_1 — это часть количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива: $Q_1 = \eta_1 mq$.

Тогда $\dfrac{T_1 - T_2}{T_1} = \dfrac{A}{\eta_1 mg}$, откуда $A = \eta_1 mq(1 - T_2/T_1) = 1{,}2 \cdot 10^9$ Дж.

Задача 2. Паровая машина мощностью $N = 14{,}7$ кВт потребляет за 1 ч работы топливо массой $m = 8{,}1$ кг, с удельной теплотой сгорания $q = 3{,}3 \cdot 10^7$ Дж/кг. Температура котла 200 °С, холодильника 58 °С. Определите КПД этой машины и сравните его с КПД идеальной тепловой машины.

Решение. КПД тепловой машины равен отношению совершённой механической работы A к затраченному количеству теплоты Q_1, выделяющейся при сгорании топлива. Количество теплоты $Q_1 = mq$.

Совершённая за это же время работа $A = Nt$.

Таким образом, $\eta = A/Q_1 = Nt/qm = 0{,}198$, или $\eta \approx 20\,\%$.

Для идеальной тепловой машины $\eta_{ид} = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1} 100\,\% = 30\,\%$, $\eta < \eta_{ид}$.

Итак, КПД идеальной тепловой машины, как и следовало ожидать, больше КПД реальной машины.

Задача 3. Идеальная тепловая машина с КПД η работает по обратному циклу (рис. 13.15). Какое максимальное количество теплоты можно забрать от холодильника, совершив механическую работу A?

Решение. Поскольку холодильная машина работает по обратному циклу, то для перехода тепла от менее нагретого тела к более нагретому необходимо, чтобы внешние силы совершили положительную работу. Прин-

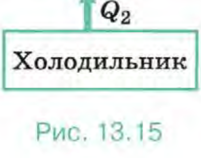


Рис. 13.15

ципиальная схема холодильной машины: от холодильника отбирается количество теплоты Q_2, внешними силами совершается работа и нагревателю передаётся количество теплоты Q_1. Следовательно, $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, откуда $Q_2 = Q_1(1 - \eta)$, $Q_1 = A/\eta$.

Окончательно $Q_2 = (A/\eta)(1 - \eta)$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Какой должна быть температура нагревателя, для того чтобы стало возможным достижение значения КПД тепловой машины 80 %, если температура холодильника 27 °С?

2. В процессе работы тепловой машины за некоторое время рабочим телом было получено от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 1{,}5 \cdot 10^6$ Дж, передано холодильнику количество теплоты $Q_2 = -1{,}2 \cdot 10^6$ Дж. Вычислите КПД машины и сравните его с максимально возможным КПД, если температуры нагревателя и холодильника соответственно равны 250 °С и 30 °С.

3. В паровой турбине для получения пара с температурой 250 °С сжигают дизельное топливо массой 0,35 кг. При этом пар совершает работу 1 кВт · ч. Температура холодильника 30 °С. Вычислите КПД турбины. Удельная теплота сгорания дизельного топлива 42 МДж/кг.

4. В цилиндре находится газ, для нагревания которого сжигают нефть массой 2 кг с удельной теплотой сгорания $4{,}3 \cdot 10^7$ Дж/кг. Расширяясь, газ совершает работу 10 кВт · ч. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Чему равен КПД установки?

5. Двигатель автомобиля развивает мощность 25 кВт. Определите КПД двигателя, если при скорости 60 км/ч он потребляет 12 л бензина на 100 км пути. Плотность бензина 700 кг/м^3. При сгорании 1 кг бензина выделяется количество теплоты, равное $4{,}5 \cdot 10^7$ Дж.

Повторите материал главы 13 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Тепловые двигатели и их роль в жизни человека»

1. Модели вечных двигателей. Их разоблачение.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Дизельный двигатель.
3. С. Карно — создатель термодинамики.
4. Проблемы и пути повышения КПД тепловых двигателей.
5. Применение тепловых двигателей.
6. Экологические проблемы использования тепловых двигателей.

«Проектирование и моделирование теплового двигателя»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Приступим к изучению нового раздела физики — «Электродинамика». Речь пойдёт о процессах, которые определяются движением и взаимодействием электрически заряженных частиц. Изучение природы этого взаимодействия приведёт нас к одному из самых фундаментальных понятий физики — *электромагнитному полю.*

Важно **Электродинамика** — это наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи — электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами или частицами.

Среди четырёх типов взаимодействий, открытых наукой, — гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых — именно электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию проявлений. В повседневной жизни и технике мы чаще всего встречаемся с различными видами электромагнитных сил. Достаточно напомнить, что электромагнитные взаимодействия позволяют видеть всё вокруг, так как свет — одна из форм электромагнитного поля.

К созданию электродинамики привела длинная цепь планомерных исследований и случайных открытий, начиная с обнаружения способности янтаря, потёртого о шерсть, притягивать лёгкие предметы и кончая гипотезой великого английского учёного Джеймса Клерка Максвелла о порождении магнитного поля переменным электрическим полем. Лишь во второй половине XIX в., после создания электродинамики, началось широкое практическое использование электромагнитных явлений. Изобретение радио русским учёным А. С. Поповым (1859—1906) и итальянским учёным Г. Маркони (1874—1937) — одно из важнейших применений принципов новой теории.

При развитии электродинамики впервые научные исследования предшествовали техническим применениям. Если паровая машина была построена задолго до создания теории тепловых процессов, то сконструировать электродвигатель или радиоприёмник оказалось возможным лишь после открытия и изучения законов электродинамики.

Бесчисленные практические применения электромагнитных явлений преобразовали жизнь людей на всём земном шаре. Современная цивилизация немыслима без электрического тока.

Телевизоры, компьютеры, электроплиты и многое другое, что кажется для нас естественным и привычным, образуют своеобразную среду обитания, об истоках которой мы не задумываемся. Нам кажется, что это существовало вечно. Однако это далеко не так, и стоит задуматься, что любой прибор, которым мы пользуемся, работает на основе того или иного физического закона.

Наша задача состоит в изучении основных законов электромагнитных взаимодействий, а также в знакомстве с основными способами получения электрической энергии и использования её на практике.

ГЛАВА 14 ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда электрически заряженные тела находятся в покое.

Запомни Раздел электродинамики, посвящённый изучению условий равновесия электрически заряженных тел, называют **электростатикой.**

§ 84 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

Вспомните из курса физики основной школы определение электрического заряда.
Какие существуют заряды?

Со словами *электричество, электрический заряд, электрический ток* вы встречались много раз и успели к ним привыкнуть. Но попробуйте ответить на вопрос: «Что такое электрический заряд?» Само понятие *заряд* — это основное, первичное понятие, которое не сводится на современном уровне развития наших знаний к каким-либо более простым, элементарным понятиям.

Попытаемся сначала выяснить, что понимают под утверждением: «Данное тело или частица имеет электрический заряд».

Запомни Все тела построены из мельчайших частиц, которые неделимы на более простые и поэтому называются **элементарными.**

Рис. 14.1

Элементарные частицы имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу согласно закону всемирного тяготения. С увеличением расстояния между частицами сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату этого расстояния. Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но эта сила во много раз превосходит силу тяготения. Так, в атоме водорода, изображённом схематически на рисунке 14.1, электрон притягивается к ядру (протону) с силой, в 10^{39} раз превышающей силу гравитационного притяжения.

Важно Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые убывают с увеличением расстояния так же, как и силы всемирного тяготения, но превышают силы тяготения во много раз, то говорят, что *эти частицы имеют электрический заряд.* Сами частицы называются *заряженными.*

Бывают частицы без электрического заряда, но не существует электрического заряда без частицы.

Запомни Взаимодействие заряженных частиц называется **электромагнитным.**

Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Электрический заряд элементарной частицы — это не особый механизм в частице, который можно было бы снять с неё, разложить на составные части и снова собрать. Наличие электрического заряда у электрона и других частиц означает лишь существование определённых силовых взаимодействий между ними.

Интересно Мы, в сущности, ничего не знаем о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов взаимодействий должно входить в наши представления о заряде. Эти законы непросты, и изложить их в нескольких словах невозможно. Поэтому нельзя дать достаточно удовлетворительное краткое определение понятию *электрический заряд*.

Два знака электрических зарядов. Все тела обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу. Заряженные же тела могут как притягивать, так и отталкивать друг друга. Этот важнейший факт, знакомый вам, означает, что

Важно в природе есть частицы с электрическими зарядами противоположных знаков; в случае зарядов одинаковых знаков частицы отталкиваются, а в случае разных притягиваются.

Прочитайте в Интернете или других источниках об истории открытия электрона.

Заряд элементарных частиц — *протонов*, входящих в состав всех атомных ядер, называют положительным, а заряд *электронов* — отрицательным. Между положительными и отрицательными зарядами внутренних различий нет. Если бы знаки зарядов частиц поменялись местами, то от этого характер электромагнитных взаимодействий нисколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть ещё несколько типов заряженных элементарных частиц. Но только электроны и протоны могут неограниченно долго существовать в свободном состоянии. Остальные же заряженные частицы живут менее миллионных долей секунды. Они рождаются при столкновениях быстрых элементарных частиц и, просуществовав ничтожно малое время, распадаются, превращаясь в другие частицы. С этими частицами вы познакомитесь в 11 классе.

К частицам, не имеющим электрического заряда, относится *нейтрон*. Его масса лишь незначительно превышает массу протона. Нейтроны вместе с протонами входят в состав атомного ядра. Если элементарная частица имеет заряд, то его значение строго определено.

Заряженные тела. Электромагнитные силы в природе играют огромную роль благодаря тому, что в состав всех тел входят электрически заряженные частицы. Составные части атомов — ядра и электроны — обладают электрическим зарядом.

Важно Непосредственно действие электромагнитных сил между телами не обнаруживается, так как тела в обычном состоянии электрически нейтральны.

Атом любого вещества нейтрален, так как число электронов в нём равно числу протонов в ядре. Положительно и отрицательно заряженные частицы связаны друг с другом электрическими силами и образуют нейтральные системы.

Макроскопическое тело заряжено электрически в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с каким-либо одним знаком заряда. Так, отрицательный заряд тела обусловлен избытком числа электронов по сравнению с числом протонов, а положительный — недостатком электронов.

Важно Для того чтобы получить электрически заряженное макроскопическое тело, т. е. *наэлектризовать* его, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного или перенести на нейтральное тело отрицательный заряд.

Это можно сделать с помощью трения. Если провести расчёской по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц — электронов перейдёт с волос на расчёску и зарядит её отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

Наэлектризуйте линейку, потерев её тканью. Нарежьте маленькие кусочки бумаги и исследуйте, как на них действует линейка. Через некоторое время опять поднесите линейку к кусочкам бумаги. Сохранился ли на линейке заряд? Объясните свои наблюдения.

Равенство зарядов при электризации.

Важно С помощью опыта можно доказать, что при электризации трением оба тела приобретают заряды, противоположные по знаку, но одинаковые по модулю.

Возьмём электрометр, на стержне которого укреплена металлическая сфера с отверстием, и две пластины на длинных рукоятках: одна из эбонита, а другая из плексигласа. При трении друг о друга пластины электризуются.

Внесём одну из пластин внутрь сферы, не касаясь её стенок. Если пластина заряжена положительно, то часть электронов со стрелки и стержня электрометра притянется к пластине и соберётся на внутренней поверхности сферы. Стрелка при этом зарядится положительно и оттолкнётся от стержня электрометра (рис. 14.2, *а*).

Если внести внутрь сферы другую пластину, вынув предварительно первую, то электроны сферы и стержня будут отталкиваться от пластины и соберутся в избытке на стрелке. Это вызовет отклонение стрелки от стержня, причём на тот же угол, что и в первом опыте.

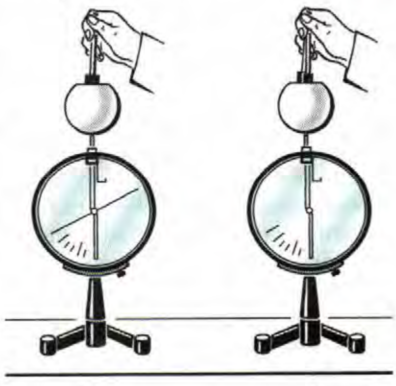


Рис. 14.2

Опустив обе пластины внутрь сферы, мы вообще не обнаружим отклонения стрелки (рис. 14.2, *б*). Это доказывает, что заряды пластин равны по модулю и противоположны по знаку.

Электризация тел и её проявления. Значительная электризация происходит при трении синтетических тканей. Снимая с себя рубашку из синтетического материала в сухом воздухе, можно слышать характерное потрескивание. Между заряженными участками трущихся поверхностей проскакивают маленькие искорки.

Интересно С явлением электризации приходится считаться на производстве. Так, нити пряжи на текстильных фабриках электризуются за счёт трения, притягиваются к веретёнам и роликам и рвутся. Пряжа притягивает пыль и загрязняется.
В типографиях происходит электризация бумаги при печати, и листы слипаются. Чтобы это не происходило, применяют специальные устройства для стекания заряда.
Однако электризация тел при тесном контакте иногда используется, например, в различных электрокопировальных установках и др.

Закон сохранения электрического заряда. Опыт с электризацией пластин доказывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между телами, до этого нейтральными. Небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое. При этом новые частицы не возникают, а существовавшие ранее не исчезают.

При электризации тел выполняется *закон сохранения электрического заряда*. Этот закон справедлив для системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для *изолированной системы*.

Закон сохранения электрического заряда В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел сохраняется.

Если заряды тел обозначить через q_1, q_2 и т. д., то

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}. \qquad (14.1)$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не меняется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами; исчезают заряженные частицы тоже только парами, превращаясь в нейтральные. И во всех этих случаях алгебраическая сумма зарядов остаётся одной и той же.

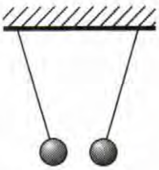
Справедливость закона сохранения заряда подтверждают наблюдения над огромным числом превращений элементарных частиц. Этот закон выражает одно из самых фундаментальных свойств электрического заряда. Причина сохранения заряда до сих пор неизвестна.

Заряд. Электрон. Протон. Электризация тел Найти

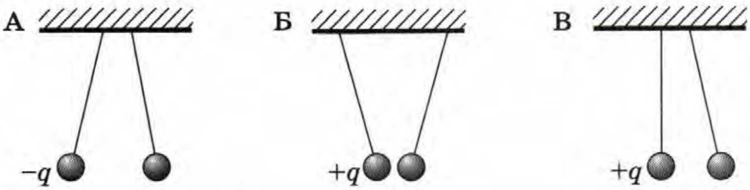
1. Какие взаимодействия называют электромагнитными?
2. Что такое элементарный заряд?
3. Как можно определить, имеет тело заряд или не имеет?
4. Приведите примеры явлений, вызванных электризацией тел, которые вы наблюдали в повседневной жизни.
5. Почему при перевозке бензина к цистерне прикрепляют металлическую цепь, касающуюся земли?
6. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
7. Приведите примеры явлений, в которых наблюдается сохранение заряда.

A1. Два точечных заряда притягиваются друг к другу только в том случае, если заряды
1) одинаковы по знаку и любые по модулю
2) одинаковы по знаку и обязательно одинаковы по модулю
3) различны по знаку и любые по модулю
4) различны по знаку, но обязательно одинаковы по модулю

A2. На тонких шёлковых нитях подвешены два заряженных одинаковых шарика (см. рис.).
Какое из утверждений верно?
1) Заряды шариков обязательно равны по модулю
2) Силы, действующие на каждый из шариков, различны
3) Заряды шариков имеют одинаковый знак
4) Заряды шариков имеют разные знаки



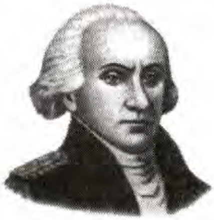
A3. На рисунке изображены три пары заряженных лёгких одинаковых шариков, подвешенных на шёлковых нитях. Заряд одного из шариков указан на рисунках. В каком случае заряд другого шарика может быть отрицателен?
1) А   2) А и Б   3) В   4) А и В



A4. На двух одинаковых металлических шарах находятся положительный заряд $+Q$ и отрицательный заряд $-5Q$. При соприкосновении шаров заряд на каждом шаре станет равен
1) $-4Q$ 2) $+6Q$ 3) $-2Q$ 4) $+3Q$

§ 85 ЗАКОН КУЛОНА. ЕДИНИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Какие взаимодействия называют электромагнитными?
В чём проявляется взаимодействие зарядов?



Ш. Кулон
(1736—1806)

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий. Основной закон электростатики — закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел.

Основной закон электростатики был экспериментально установлен Шарлем Кулоном в 1785 г. и носит его имя.

Если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействия между ними.

Вспомните, что и закон всемирного тяготения тоже сформулирован для тел, которые можно считать материальными точками.

Запомни Заряженные тела, размерами и формой которых можно пренебречь при их взаимодействии, называются **точечными зарядами.**

Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между заряженными телами. Пока будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме. Опыт показывает, что воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел, она оказывается почти такой же, как и в вакууме.

Опыты Кулона. Идея опытов Кулона аналогична идее опыта Кавендиша по определению гравитационной постоянной. Открытие закона взаимодействия электрических зарядов было облегчено тем, что эти силы оказались велики и благодаря этому не нужно было применять особо чувствительную аппаратуру, как при проверке закона всемирного тяготения в земных условиях. С помощью крутильных весов удалось установить, как взаимодействуют друг с другом неподвижные заряженные тела.

Рис. 14.3

Крутильные весы состоят из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволочке (рис. 14.3). На одном конце палочки закреплён маленький металлический шарик a, а на другом — противовес c. Ещё один металлический шарик b закреплён неподвижно на стержне, который, в свою очередь, крепится на крышке весов.

При сообщении шарикам одноимённых зарядов они начинают отталкиваться друг от друга. Чтобы удержать их на фиксированном расстоянии, упругую проволочку нужно закрутить на некоторый угол до тех пор, пока возникшая сила упругости не скомпенсирует кулоновскую силу отталкивания шариков. По углу закручивания проволочки определяют силу взаимодействия шариков.

Крутильные весы позволили изучить зависимость силы взаимодействия заряженных шариков от значений зарядов и от расстояния между ними. Измерять силу и расстояние в то время умели. Единственная трудность была связана с зарядом, для измерения которого не существовало даже единиц. Кулон нашёл простой способ изменения заряда одного из шариков в 2, 4 и более раза, соединяя его с таким же незаряженным шариком. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, что и уменьшало исследуемый заряд в известном отношении. Новое значение силы взаимодействия при новом заряде определялось экспериментально.

Закон Кулона. Опыты Кулона привели к установлению закона, поразительно напоминающего закон всемирного тяготения.

Закон Кулона

Сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Запомни Силу взаимодействия зарядов называют **кулоновской силой.**

Если обозначить модули зарядов через $|q_1|$ и $|q_2|$, а расстояние между ними через r, то закон Кулона можно записать в следующей форме:

$$\boxed{F = k\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2},} \qquad (14.2)$$

Подумайте, может ли сила взаимодействия при увеличении одного из зарядов остаться прежней.

где k — коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины. Его значение зависит от выбора системы единиц.

Интересно

Такую же форму (14.2) имеет закон всемирного тяготения, только вместо заряда в закон тяготения входят массы, а роль коэффициента k играет гравитационная постоянная.

Легко обнаружить, что два заряженных шарика, подвешенные на нитях, либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. Отсюда следует, что

Важно силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды (рис. 14.4).

Подобные силы называют *центральными*. В соответствии с третьим законом Ньютона $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$.

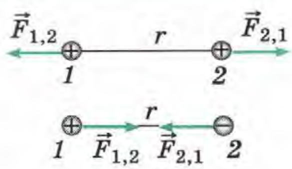


Рис. 14.4

Единица электрического заряда. Выбор единицы заряда, как и других физических величин, произволен. Естественно было бы за единицу принять заряд электрона, что и сделано в атомной физике, но этот заряд слишком мал, и поэтому пользоваться им в качестве единицы заряда не всегда удобно.

В Международной системе единиц (СИ) единица заряда является не основной, а производной и эталон для неё не вводится. Наряду с метром, секундой и килограммом в СИ введена основная единица для электрических величин — единица силы тока — *ампер*. Эталонное значение ампера устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов.

Единицу заряда в СИ — *кулон* устанавливают с помощью единицы силы тока.

Важно Один кулон (1 Кл) — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А: 1 Кл = 1 А · 1 с.

Единица коэффициента k в законе Кулона при записи его в единицах СИ — Н · м^2/Кл^2, так как согласно формуле (14.2) имеем

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1|\,|q_2|}, \tag{14.3}$$

где сила взаимодействия зарядов выражается в ньютонах, расстояние — в метрах, заряд — в кулонах. Числовое значение этого коэффициента можно определить экспериментально. Для этого надо измерить силу взаимодействия F между двумя известными зарядами $|q_1|$ и $|q_2|$, находящимися на заданном расстоянии r, и эти значения подставить в формулу (14.3). Полученное значение k будет равно:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2. \tag{14.4}$$

Интересно Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов, по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд в 1 Кл невозможно. Отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться на теле. Никаких других сил, способных в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует. Но в проводнике, который в целом нейтрален, привести в движение заряд в 1 Кл не составляет большого труда. Ведь в обычной электрической лампочке мощностью 200 Вт при напряжении 220 В сила тока немного меньше 1 А. При этом за 1 с через поперечное сечение проводника проходит заряд, почти равный 1 Кл.

Вместо коэффициента k часто применяется другой коэффициент, который называется *электрической постоянной* ε_0. Она связана с коэффициентом k следующим соотношением: $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$. Закон Кулона в этом случае имеет вид

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2}.$$

Если заряды взаимодействуют в среде, то сила взаимодействия уменьшается:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|\,|q_2|}{\varepsilon r^2},$$

где ε — *диэлектрическая проницаемость* среды, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Минимальный заряд, существующий в природе, — это заряд элементарных частиц. В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$\boxed{e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл.}} \qquad (14.5)$$

Заряд, который можно сообщить телу, всегда кратен минимальному заряду:

$$q = \pm N|e|,$$

где N — целое число. Когда заряд тела существенно больше по модулю минимального заряда, то проверять кратность не имеет смысла, однако когда речь идёт о заряде частиц, ядер атомов, то заряд их должен быть всегда равен целому числу модулей заряда электрона.

Кулон. Закон Кулона. Опыт Кулона — Найти

1. В чём сходство и различие закона всемирного тяготения и закона Кулона?
2. При каком условии заряженное тело можно считать точечным зарядом?
3. Как определяется единица заряда?
4. Чему равен заряд протона?

A1. Какая из приведённых ниже формул выражает в СИ модуль силы взаимодействия точечных зарядов $-q_1$ и $+q_2$, расположенных на расстоянии r друг от друга в вакууме? Определите, электрические заряды притягиваются или отталкиваются.

1) $\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1q_2}{r}$, притягиваются
3) $\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1q_2}{r^2}$, притягиваются
2) $\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1q_2}{r}$, отталкиваются
4) $\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q_1q_2}{r^2}$, отталкиваются

A2. Сила кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов
1) прямо пропорциональна расстоянию между ними
2) обратно пропорциональна расстоянию между ними
3) прямо пропорциональна квадрату расстояния между ними
4) обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

A3. С какой силой взаимодействуют два маленьких заряженных шарика, находящиеся в вакууме на расстоянии 9 см друг от друга? Заряд каждого шарика равен $3 \cdot 10^{-6}$ Кл.
1) 0,09 Н 2) 1 Н 3) 10 Н 4) $3{,}3 \cdot 10^6$ Н

A4. Два точечных заряда действуют друг на друга с силой 12 Н. Какой будет сила взаимодействия между ними, если уменьшить значение каждого заряда в 2 раза, не меняя расстояние между ними?
1) 3 Н 2) 6 Н 3) 24 Н 4) 48 Н

A5. Два точечных электрических заряда действуют друг на друга с силами 9 мкН. Какими станут силы взаимодействия между ними, если, не меняя расстояние между зарядами, увеличить модуль каждого из них в 3 раза?
1) 1 мкН 2) 3 мкН 3) 27 мкН 4) 81 мкН

§ 86 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН КУЛОНА»

При решении задач на применение закона Кулона используются те же приёмы, что и при решении задач в курсе механики. Надо лишь иметь в виду, что направление кулоновской силы зависит от знаков зарядов взаимодействующих тел. Кроме того, в ряде задач используется закон сохранения заряда и тот факт, что заряд любого тела кратен заряду электрона.

Задача 1. Сколько электронов содержится в капле воды массой $m = 0{,}03$ г? Масса молекулы воды $m_0 = 3 \cdot 10^{-23}$ г.

Решение. Молекула воды (H_2O) содержит 10 электронов. В капле воды содержится $N = \frac{m}{m_0}$ молекул, и, следовательно, число электронов $Z = 10\frac{m}{m_0} = 10^{22}$ электронов.

Задача 2. Два одинаковых шарика подвешены на нитях длиной $l = 2{,}0$ м к одной точке. Когда шарикам сообщили одинаковые заряды по $q = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл, они разошлись на расстояние $r = 16$ см. Определите натяжение каждой нити и массу каждого шарика.

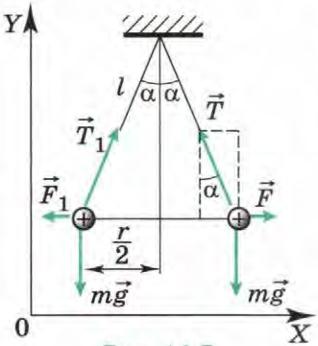


Рис. 14.5

Решение. На каждый шарик действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$, сила натяжения нити и кулоновская сила (рис. 14.5).

Каждый шарик неподвижен, следовательно, суммы проекций сил на оси OX и OY равны нулю. Для суммы проекций сил, действующих на правый шарик, на ось OX это условие имеет вид $F - T\sin\alpha = 0$. Так как $\sin\alpha = \frac{r}{2l}$ и $F = k\frac{q^2}{r^2}$, то

$$T = \frac{F}{\sin\alpha} = \frac{F2l}{r} = k\frac{q^2 2l}{r^3} \approx 3{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{Н}.\ |\vec{T}| = |\vec{T}_1|.$$

В проекциях на ось OY условие равновесия для каждого из шариков имеет вид $T\cos\alpha - mg = 0$, откуда с учётом того, что $\cos^2\alpha = 1 - \sin^2\alpha$, получим $m = \frac{T\cos\alpha}{g} = k\frac{q^2 2l}{gr^3}\sqrt{1 - \left(\frac{r}{2l}\right)^2} \approx 3{,}6 \cdot 10^{-4}$ кг.

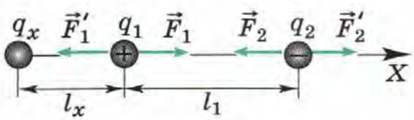


Рис. 14.6

Задача 3. Два разноимённых заряда $q_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл и $q_2 = -8 \cdot 10^{-4}$ Кл расположены на расстоянии 1 м друг от друга. Какой заряд q_x и где надо поместить, чтобы система зарядов находилась в равновесии?

Решение. Заряды q_1 и q_2 разноимённые, следовательно, они притягиваются и на них действуют силы $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$ соответственно (рис. 14.6). Для равновесия каждого из зарядов необходимо, чтобы на заряды q_1 и q_2 со стороны заряда q_x действовали силы $\vec{F_1'}$ и $\vec{F_2'}$, равные по модулю силам $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$ и противоположные по направлению. Поскольку $q_1 < |q_2|$, заряд q_x должен быть помещён слева от заряда q_1, чтобы силы, действующие на заряды q_1 и q_2 со стороны заряда q_x, были равны. Заряд q_x должен быть отрицательным, т. е. притягивать заряд q_1 и отталкивать заряд q_2:

$$\vec{F_1} = -\vec{F_1'}, \quad \vec{F_2} = -\vec{F_2'}.$$

В проекциях на ось X эти уравнения имеют вид $F_1 = F_1'$, $F_2 = F_2'$, или

$$k\frac{q_1\,|q_2|}{l^2} = k\frac{|q_x|\,q_1}{l_x^2},$$

$$k\frac{q_1\,|q_2|}{l^2} = k\frac{|q_x|\,|q_2|}{(l+l_x)^2}.$$

Решим полученную систему уравнений относительно двух неизвестных q_x и l_x. Из первого уравнения выразим $|q_x|$: $|q_x| = \dfrac{|q_2|\,l_x^2}{l^2}$ — и подставим во второе.

Получим уравнение $\dfrac{|q_2|}{(l+l_x)^2} = \dfrac{q_1}{l_x^2}$, или $\left|\dfrac{q_2}{q_1}\right| l_x^2 = (l + l_x)^2$. Подставим значения зарядов: $4 = \left(\dfrac{l + l_x}{l_x}\right)^2$, или $\dfrac{l + l_x}{l_x} = \pm 2$.

Решением этого уравнения, удовлетворяющим физическому смыслу, является $l_x = 1$ м.

Подставив это значение в формулу для $|q_x|$, получим $|q_x| = |q_2| = 8 \cdot 10^{-4}$ Кл, или $q_x = -8 \cdot 10^{-4}$ Кл.

Задача 4. Два заряженных шарика, находящиеся друг от друга на расстоянии $r = 90$ см и помещённые в керосин, притягиваются друг к другу с силой $F = 80$ Н. Определите заряды шариков, если сумма их зарядов $q = 4 \cdot 10^{-5}$ Кл. Относительная диэлектрическая проницаемость керосина $\varepsilon = 2$.

Решение. Так как шарики притягиваются, то их заряды противоположны по знаку. Предположим, что заряд первого шарика положителен и равен q_1, а второго отрицателен и равен q_2. Согласно условию задачи

$$q_1 + q_2 = q, \text{ или } \quad q_1 - |q_2| = q. \qquad (1)$$

По закону Кулона сила притяжения зарядов равна:

$$F = k\frac{q_1|q_2|}{\varepsilon r^2}. \qquad (2)$$

Уравнения (1) и (2) — система двух уравнений относительно двух неизвестных q_1 и $|q_2|$.

Выразив из уравнения (2) $q_1 = \frac{F\varepsilon r^2}{k|q_2|}$ и подставив в уравнение (1), получим $\frac{F\varepsilon r^2}{k|q_2|} - |q_2| = q$.

Относительно модуля заряда $|q_2|$ получим уравнение $|q_2|^2 + q|q_2| - \frac{F\varepsilon r^2}{k} = 0$.

Отсюда $|q_2| = -\frac{q}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \frac{F\varepsilon r^2}{k}}$. Модуль числа всегда положителен, поэтому оставляем один корень $|q_2| \approx 10^{-4}$ Кл.

Таким образом, $q_2 = -10^{-4}$ Кл, а $q_1 = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$ Кл.

Задача 5. Два одинаковых небольших одноимённо заряженных шарика радиусом 1 см, массой 10 г и зарядом $4 \cdot 10^{-6}$ Кл подвешены в одной точке на двух нитях длиной 1 м в жидком диэлектрике. Плотность диэлектрика $\rho = 800$ кг/м^3. Определите относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика ε, если угол между нитями $2\alpha = 60°$.

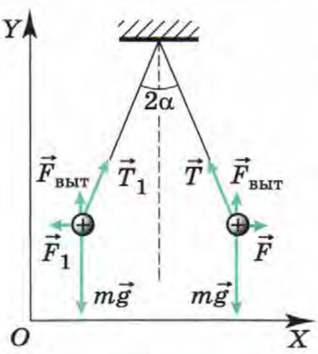


Рис. 14.7

Решение. На каждый шарик действуют сила тяжести, сила натяжения нити, выталкивающая сила и сила Кулона (рис. 14.7).

Условия равновесия шариков $m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_{\text{выт}} + \vec{F} = 0$, $m\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{F}_1 + \vec{F}_{\text{выт}} = 0$, $T = T_1$, $F = F_1$.

В проекциях на оси координат для правого шарика запишем:

на ось OX: $-T\sin\alpha + F = 0$;

на ось OY: $-mg + T\cos\alpha + F_{\text{выт}} = 0$.

Выразив силу T из этих уравнений и приравняв правые части полученных выражений, найдём

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F}{mg - F_{\text{выт}}}. \qquad (1)$$

При этом сила Кулона $F = k\frac{q^2}{\varepsilon r_{12}^2}$, где $r_{12} = 2l\sin\alpha$, а выталкивающая сила $F_{\text{выт}} = \rho\frac{4}{3}\pi r^3 g$.

Подставим эти выражения в уравнение (1) и найдём диэлектрическую проницаемость: $\varepsilon = \frac{kq^2}{4g(l\sin\alpha)^2\,(m - \rho\frac{4}{3}\pi r^3)\operatorname{tg}\alpha} \approx 3{,}7$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите силу взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода, если расстояние между ними равно $0{,}5 \cdot 10^{-8}$ см.

2. С какой силой взаимодействовали бы две капли воды на расстоянии 1 км, если бы удалось передать одной из капель 1% всех электронов, содержащихся в другой капле массой 0,03 г?

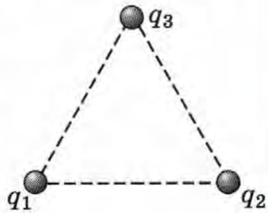
3. Два одинаковых шарика находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Заряд одного из них $9 \cdot 10^{-9}$ Кл, а заряд другого $-2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Шарики привели в соприкосновение и вновь раздвинули на такое же расстояние. Определите силы их взаимодействия до и после соприкосновения.

4. Точечные заряды $1{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл и $2{,}0 \cdot 10^{-8}$ Кл закреплены на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме. На середине отрезка, соединяющего эти заряды, на одинаковом расстоянии от каждого из них помещён точечный заряд, равный $-3 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определите модуль и направление силы, действующей на него.

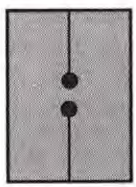
5. Два одинаковых маленьких шарика подвешены в одной точке на нитях длиной 1 м в масле с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2{,}2$. Шарикам сообщили одинаковые заряды $9 \cdot 10^{-6}$ Кл, при этом нити разошлись на угол 60°. Определите массу каждого шарика. Размерами шариков можно пренебречь.

A1. Как изменится модуль силы взаимодействия двух небольших металлических шариков одинакового диаметра, имеющих заряды $q_1 = +6$ нКл и $q_2 = -2$ нКл, если шары привести в соприкосновение и раздвинуть на прежнее расстояние?

1) увеличится в 9 раз
2) увеличится в 3 раза
3) увеличится в 8 раз
4) уменьшится в 3 раза



C2. Три медных шарика диаметром 1 см каждый расположены в воздухе в вершинах правильного треугольника со стороной 20 см. Первый шарик несёт заряд $q_1 = 80$ нКл, второй — $q_2 = 30$ нКл, а третий — $q_3 = 40$ нКл. С какой силой второй шарик действует на первый? Ответ выразите в микроньютонах.



C3. Два пробковых противоположно заряженных шарика привязаны на нитях ко дну и к перекладине в верхней части сосуда, заполненного маслом (см. рис.) Диаметр шариков 2 мм, длина нитей 40 см, расстояние между центрами шариков 10 см. Считая нити невесомыми, определите натяжение верхней нити. Плотность пробки 130 кг/м^3, плотность масла 800 кг/м^3, его диэлектрическая проницаемость 6, модуль заряда шариков $3 \cdot 10^{-8}$ Кл. Ответ выразите в миллиньютонах и округлите до сотых.

§ 87 БЛИЗКОДЕЙСТВИЕ И ДЕЙСТВИЕ НА РАССТОЯНИИ

Как передаётся действие Земли на парящие в воздухе тела?
Как вызвать движение велосипеда?

Закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов был установлен экспериментально. Но оставался нерешённым вопрос о том, как осуществляется это взаимодействие.

Близкодействие. Если мы наблюдаем действие одного тела на другое, находящееся на некотором расстоянии от него, то, прежде чем допустить, что это действие прямое и непосредственное, мы склонны сначала исследовать, нет ли между телами какой-либо материальной связи: нитей, стержней и т. д. Если подобные связи есть, то мы объясняем действие одного тела на другое при помощи этих промежуточных звеньев.

При игре в теннис посредниками, передающими взаимодействие теннисистов, являются ракетки и мяч.

При подъёме груза используется подъёмный кран, которым управляет крановщик, находящийся в кабине.

Водитель автобуса заставляет дверь открываться, направляя по трубкам сжатый воздух в цилиндр, управляющий механизмом двери.

> Приведите примеры передачи механического воздействия без непосредственного контакта тел.

Во всех трёх примерах мы видим ряд последовательных действий, в результате которых совершается некоторый физический процесс. С помощью этого процесса, распространяющегося от точки к точке, происходит передача действия, причём *не мгновенно*, а с той или иной скоростью.

Итак, действие между телами на расстоянии во многих случаях можно объяснить присутствием передающих действие промежуточных звеньев. Не разумно ли в тех случаях, когда мы не замечаем никакой среды, никакого посредника между взаимодействующими телами, допустить существование некоторых промежуточных звеньев? Ведь иначе придётся считать, что тело действует там, где его нет.

Кому незнакомы свойства воздуха, тот может подумать, что рот или голосовые связки собеседника непосредственно действуют на уши, и считать, что звук передаётся невидимой средой, свойства которой непонятны. Однако можно проследить весь процесс распространения звуковых волн и вычислить их скорость.

Важно Согласно теории близкодействия взаимодействие между удалёнными друг от друга телами всегда осуществляется с помощью промежуточных звеньев (или среды), передающих взаимодействие от точки к точке.

Многие учёные, сторонники теории близкодействия, для объяснения происхождения гравитационных и электромагнитных сил придумывали невидимые истечения, окружающие планеты и магниты, незримые атмосферы вокруг наэлектризованных тел. Размышления эти были подчас весьма остроумны, но обладали немаловажным недостатком — они ничего не давали науке.

Действие на расстоянии (дальнодействие). Так продолжалось до тех пор, пока Ньютон не установил закон всемирного тяготения. Последовавшие успехи в исследовании Солнечной системы настолько захватили воображение учёных, что они вообще в большинстве своём начали склоняться к мысли о бесполезности поисков каких-либо посредников, передающих взаимодействие от одного тела к другому.

Возникла теория прямого действия на расстоянии через пустоту.

Важно Согласно теории дальнодействия действие передаётся мгновенно на сколь угодно большие расстояния. Тела способны «чувствовать» присутствие друг друга без какой-либо среды между ними.

Сторонников действия на расстоянии не смущала мысль о действии тела там, где его самого нет. «Разве, — рассуждали они, — мы не видим, как магнит или наэлектризованная палочка прямо через пустоту притягивают тела?» И при этом сила притяжения, например, магнита заметно не меняется, если магнит завернуть в бумагу или положить в деревянный ящик. Более того, даже если нам и кажется, что взаимодействие тел вызвано непосредственным контактом, то в действительности это не так. При самом тесном контакте между телами или частями одного тела остаются небольшие промежутки. Ведь груз, например подвешенный на нити, не разрывает эту нить, хотя между отдельными атомами, из которых она состоит, ничего нет. Действие на расстоянии — единственный способ действия, встречающийся повсюду.

Возражения против теории близкодействия были довольно сильными, тем более что они подкреплялись успехами, которых добились такие убеждённые сторонники действия на расстоянии, как Кулон и Ампер.

Интересно

Если бы развитие науки происходило прямолинейно, то, казалось бы, победа теории действия на расстоянии обеспечена. Но в действительности развитие науки напоминает, скорее, спиралеобразную линию. Пройдя один виток, наука возвращается примерно к тем же представлениям, но уже на более высоком уровне. Именно так произошло при развитии молекулярно-кинетической теории. Атомная гипотеза Демокрита одно время была оставлена большинством учёных. Затем она возродилась в строгой математической форме и была доказана экспериментально. Так же случилось и при развитии теории близкодействия.

Успехи в открытии законов взаимодействия электрических зарядов и токов не были неразрывно связаны с представлением о действии на расстоянии. Ведь опытное исследование самих сил не предполагает наличия определённых представлений о том, как эти силы передаются. В первую очередь нужно было найти математическое выражение для сил, а выяснить их природу можно было и потом.

Близкодействие. Дальнодействие Найти

1. Какая теория — дальнодействия или близкодействия — кажется вам более привлекательной? Почему?
2. Каковы сильные стороны теории дальнодействия по сравнению с теорией близкодействия?

§ 88 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

В какой теории — дальнодействия или близкодействия — более полно выражается идея материальной связи явлений и объектов?

После длительной борьбы теория близкодействия одержала окончательную победу. Расскажем кратко, как это произошло, а также напомним, что такое электрическое поле.

М. Фарадей
(1791—1867)

Дж. Максвелл
(1831—1879)

Идеи Фарадея. Решительный поворот к представлению о близкодействии был сделан великим английским учёным Майклом Фарадеем, а окончательно завершён английским учёным Джеймсом Максвеллом.

По теории дальнодействия один заряд непосредственно чувствует присутствие другого. При перемещении одного из зарядов, например A (рис. 14.8), сила, действующая на другой заряд — B, мгновенно изменяет своё значение. Причём ни с самим зарядом B, ни с окружающим его пространством никаких изменений не происходит.

Важно Согласно идее Фарадея электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создаёт в окружающем пространстве *электрическое поле.*

Рис. 14.8

Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает. Первоначально эта идея выражала лишь уверенность Фарадея в том, что действие одного тела на другое через пустоту невозможно.

Интересно Доказательств существования поля не было. Такие доказательства и нельзя получить, исследуя лишь взаимодействие неподвижных зарядов. Успех к теории близкодействия пришёл после изучения электромагнитных взаимодействий движущихся заряженных частиц. Вначале было доказано существование переменных во времени полей и только после этого был сделан вывод о реальности электрического поля неподвижных зарядов.

Скорость распространения электромагнитных взаимодействий. Основываясь на идеях Фарадея, Максвелл сумел теоретически доказать, что

Важно электромагнитные взаимодействия должны распространяться в пространстве с конечной скоростью.

Это означает, что если слегка передвинуть заряд A (см. рис. 14.8), то сила, действующая на заряд B, изменится, но не в то же мгновение, а лишь спустя некоторое время:

$$t = \frac{AB}{c}, \tag{14.6}$$

где AB — расстояние между зарядами, а c — скорость распространения электромагнитных взаимодействий, которая равна скорости света в вакууме, т. е. примерно 300 000 км/с. При перемещении заряда A электрическое поле вокруг заряда B изменится спустя время t. Значит, между зарядами в вакууме происходит какой-то процесс, в результате которого взаимодействие между ними распространяется с конечной скоростью. Правда, эксперимент по проверке равенства (14.6) при перемещении зарядов трудно осуществить из-за большого значения скорости c. Но в этом сейчас, после изобретения радио, нет нужды, электромагнитное поле обнаруживает себя как нечто реально существующее.

Интересно

Сейчас вы можете прочитать в газетах, что радиоволны от космической станции, приближающейся к Венере, доходят до Земли за время более чем 4 мин. Станция уже может сгореть в атмосфере планеты, а посланные ею радиоволны ещё долго будут блуждать в пространстве.

Что такое электрическое поле? Мы знаем, что электрическое поле существует реально: его свойства можно исследовать опытным путём. Но мы не можем сказать, из чего это поле состоит. Здесь мы доходим до границы того, что известно науке.

Дом состоит из кирпичей, плит и других материалов, которые, в свою очередь, состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из элементарных частиц. Более же простых образований, чем элементарные частицы, мы не знаем. Так же обстоит дело и с электрическим полем: ничего более простого, чем поле, мы не знаем.

Электрическое поле — это особое состояние материи, которое нельзя обнаружить нашими органами чувств. Его можно обнаружить, лишь помещая в него электрические заряды.

При изучении электрического поля мы сталкиваемся с особым видом материи, движение которой не подчиняется законам механики Ньютона. С открытием электрического поля впервые за всю историю науки появилась глубокая идея:

Важно существуют различные виды материи и каждому из них присущи свои свойства.
Главное свойство электрического поля — действие его на электрические заряды с некоторой силой.

По действию на заряд устанавливают факт существования поля, распределение его в пространстве, изучают все его характеристики.

Запомни Электрическое поле, созданное неподвижными зарядами, называют **электростатическим.**

Оно не меняется со временем. Электростатическое поле создаётся только электрическими зарядами. Оно существует в пространстве, окружающем эти заряды, и неразрывно с ними связано.

Запомни Если поле изменяется со временем, то такое поле называют **переменным**.

Многие свойства статических и переменных полей совпадают. Однако имеются между ними и существенные различия. Говоря о свойствах поля, мы будем называть это поле просто электрическим, если данное свойство в равной мере присуще как статическим, так и переменным полям.

Интересно Мы с вами уже встречались с полем силы тяжести и полем сил тяготения. На тело, находящееся в поле силы тяжести и обладающее массой, вблизи поверхности земли действует сила тяжести аналогично тому, как на заряд, находящийся в электростатическом поле, действует сила Кулона. На спутник, обращающийся на орбите вокруг Земли, действует сила тяготения, т. е. можно сказать, что он находится в поле тяготения.

Поле. Электрическое поле Найти

1. В чём состоит отличие теории близкодействия от теории действия на расстоянии?
2. Каковы основные свойства электростатического поля?
3. Какую теорию подтверждает существование электрического поля?

A1. Скорость распространения электромагнитных взаимодействий
1) всегда равна скорости света
2) определяется только при условии, что заряды неподвижны
3) равна скорости света в вакууме
4) зависит от знаков зарядов

A2. Электрическое поле можно обнаружить
1) если оно не изменяется во времени
2) если оно изменяется во времени
3) помещая в данную точку заряд
4) если заряд движется

A3. При перемещении одного из зарядов
1) уменьшается электрическое поле другого заряда
2) его электрическое поле постепенно ослабевает
3) изменяется сила взаимодействия зарядов
4) увеличивается электрическое поле другого заряда

§ 89 НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. СИЛОВЫЕ ЛИНИИ

Что является посредником, осуществляющим взаимодействие зарядов?
Как определить, какое из двух полей более сильное? Предложите пути сравнения полей.

Напряжённость электрического поля. Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на заряд. Можно утверждать, что мы знаем о поле всё, что нам нужно, если будем знать силу, действующую на любой заряд в любой точке поля. Поэтому надо ввести такую характеристику поля, знание которой позволит определить эту силу.

Если поочерёдно помещать в одну и ту же точку поля небольшие заряженные тела и измерять силы, то обнаружится, что сила, действующая на заряд со стороны поля, прямо пропорциональна этому заряду. Действительно, пусть поле создаётся точечным зарядом q_1. Согласно закону Кулона (14.2) на точечный заряд q действует сила, пропорциональная заряду q. Поэтому отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля заряд, к этому заряду для каждой точки поля не зависит от заряда и может рассматриваться как характеристика поля.

Запомни Отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля точечный заряд, к этому заряду, называется **напряжённостью электрического поля.**

Подобно силе, напряжённость поля — *векторная величина;* её обозначают буквой $\vec{E}$:

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.} \qquad (14.7)$$

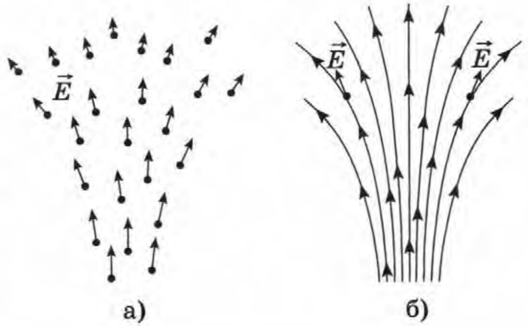
Отсюда сила, действующая на заряд q со стороны электрического поля, равна:

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E}.} \qquad (14.8)$$

Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Единица напряжённости в СИ — Н/Кл.

Силовые линии электрического поля. Электрическое поле не действует на органы чувств. Его мы не видим. Однако мы можем получить некоторое представление о распределении поля, если нарисуем векторы напряжённости поля в нескольких точках пространства (рис. 14.9, *а*). Картина будет более наглядной, если нарисовать непрерывные линии.



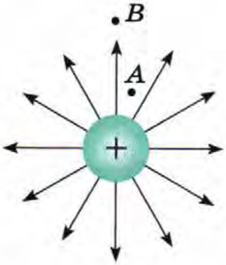


Рис. 14.10

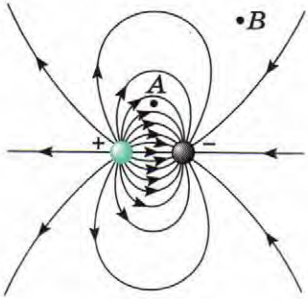


Рис. 14.11

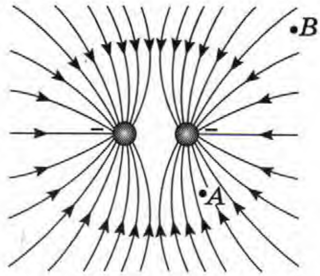


Рис. 14.12

Запомни Линии, касательная в каждой точке которых совпадает с вектором напряжённости электрического поля, называют **силовыми линиями** или **линиями напряжённости поля** (рис. 14.9, *б*).

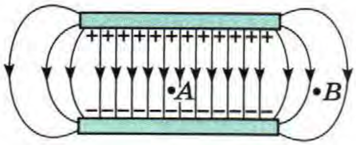


Рис. 14.13

Направление силовых линий позволяет определить направление вектора напряжённости в различных точках поля, а густота (число линий на единицу площади) силовых линий показывает, где напряжённость поля больше. Так, на рисунках 14.10—14.13 густота силовых линий в точках A больше, чем в точках B. Очевидно, что $\vec{E}_A > \vec{E}_B$.

Интересно Не следует думать, что линии напряжённости существуют в действительности вроде растянутых упругих нитей или шнуров, как предполагал сам Фарадей. Линии напряжённости помогают лишь наглядно представить распределение поля в пространстве. Они не более реальны, чем меридианы и параллели на земном шаре.

Силовые линии можно сделать видимыми. Если продолговатые кристаллики изолятора (например, хинина) хорошо перемешать в вязкой жидкости (например, в касторовом масле) и поместить туда заряженные тела, то вблизи этих тел кристаллики выстроятся в цепочки вдоль линий напряжённости.

На рисунках приведены примеры линий напряжённости: положительно заряженного шарика (см. рис. 14.10), двух разноимённо заряженных шариков (см. рис. 14.11), двух одноимённо заряженных шариков (см. рис. 14.12), двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку (см. рис. 14.13). Последний пример особенно важен. На рисунке 14.13 видно, что в пространстве между пластинами силовые линии в основном параллельны и находятся на равных расстояниях друг от друга: электрическое поле здесь одинаково во всех точках.

Начертите силовые линии электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости. Предположите, что плотность положительного заряда плоскости равна плотности заряда пластин на рисунке 14.13.

Запомни Электрическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках, называется **однородным.**

В ограниченной области пространства электрическое поле можно считать приближённо однородным, если напряжённость поля внутри этой области меняется незначительно.

Почему линии, изображающие электрическое поле, называются силовыми линиями?

Важно Силовые линии электрического поля не замкнуты, они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Силовые линии непрерывны и не пересекаются, так как пересечение означало бы отсутствие определённого направления напряжённости электрического поля в данной точке.

?

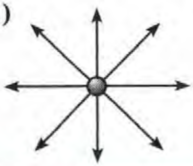
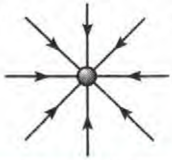
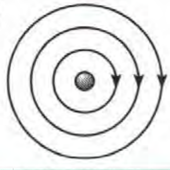
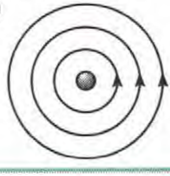
1. Что называется напряжённостью электрического поля?
2. Что называют силовыми линиями электрического поля?
3. Могут ли силовые линии пересекаться?

А1. Направление вектора напряжённости электрического поля совпадает с направлением силы, действующей на
1) незаряженный металлический шар, помещённый в электрическое поле
2) отрицательный пробный заряд, помещённый в электрическое поле
3) положительный пробный заряд, помещённый в электрическое поле
4) ответа нет, так как напряжённость поля — скалярная величина

А2. Сила, действующая в поле на заряд 0,00002 Кл, равна 4 Н. Напряжённость поля в этой точке равна
1) 200 000 Н/Кл 2) 0,00008 В/м 3) 0,0008 Н/Кл 4) $5 \cdot 10^{-6}$ Кл/Н

А3. Силовая линия электрического поля — это
1) линия, вдоль которой в поле будет двигаться положительный заряд
2) линия, вдоль которой в поле будет двигаться отрицательный заряд
3) светящаяся линия в воздухе, которая видна при большой напряжённости поля
4) линия, в каждой точке которой напряжённость поля направлена по касательной

А4. На каком рисунке правильно изображена картина линий напряжённости электростатического поля точечного положительного заряда?
1) 1 2) 3) 3 4) 4

1)

2)

3)

4)


§ 90 ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА И ЗАРЯЖЕННОГО ШАРА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ

Что показывают силовые линии?
Для чего они используются?

Напряжённость поля точечного заряда. Найдём напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом q_0. По закону Кулона этот заряд будет действовать на положительный заряд q с силой

$$F = k\frac{|q_0|\,q}{r^2}.$$

Модуль напряжённости поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен:

$$\boxed{E = \frac{F}{q} = k\frac{|q_0|}{r^2}.} \qquad (14.9)$$

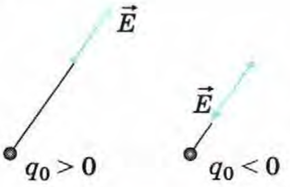


Рис. 14.14

Вектор напряжённости в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 14.14), и совпадает с силой, действующей на точечный положительный заряд, помещённый в данную точку. Силовые линии электрического поля точечного заряда, как следует из соображений симметрии, направлены вдоль радиальных линий (рис. 14.15, *а*).

Поле заряженного шара. Рассмотрим теперь вопрос об электрическом поле заряженного проводящего шара радиусом R. Заряд q равномерно распределён по поверхности шара. Силовые линии электрического поля, также из соображений симметрии, направлены вдоль продолжений радиусов шара (рис. 14.15, *б*).

Распределение в пространстве силовых линий электрического поля шара с зарядом q на расстояниях $r \geqslant R$ от центра шара аналогично распределению силовых линий поля точечного заряда q (см. рис. 14.15, *а*). Следовательно, на расстоянии $r \geqslant R$ от центра шара напряжённость поля определяется той же формулой (14.9), что и напряжённость поля точечного заряда, помещённого в центре сферы:

$$\boxed{E = k\frac{q}{r^2}.} \qquad (14.10)$$

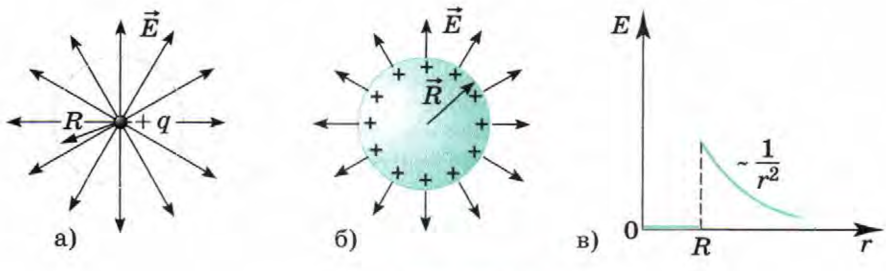


Рис. 14.15

Важно Внутри проводящего шара ($r < R$) напряжённость поля равна нулю.

В этом мы скоро убедимся. На рисунке 14.15, *в* показана зависимость напряжённости электрического поля заряженного проводящего шара от расстояния до его центра.

Принцип суперпозиции полей. Если на тело действует несколько сил, то согласно законам механики результирующая сила равна геометрической сумме этих сил:

$$\vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \ldots .$$

На электрические заряды действуют силы со стороны электрического поля. Если при наложении полей от нескольких зарядов эти поля не оказывают никакого влияния друг на друга, то результирующая сила со стороны всех полей должна быть равна геометрической сумме сил со стороны каждого поля. Опыт показывает, что именно так и происходит на самом деле. Это означает, что напряжённости полей складываются геометрически.

В этом состоит *принцип суперпозиции полей.*

Принцип суперпозиции полей

Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряжённости которых $\vec{E_1}$, $\vec{E_2}$, $\vec{E_3}$ и т. д., то результирующая напряжённость поля в этой точке равна сумме напряжённостей этих полей:

$$\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2} + \vec{E_3} + \ldots . \quad (14.11)$$

Напряжённость поля, создаваемого отдельным зарядом, определяется так, как будто других зарядов, создающих поле, не существует.

Согласно принципу суперпозиции полей для нахождения напряжённости поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение (14.9) для напряжённости поля точечного заряда. Для определения направления векторов напряжённостей полей отдельных зарядов мысленно помещаем в выбранную точку положительный заряд.

На рисунке 14.16 показано, как определяется напряжённость поля $\vec{E}$ в точке A, созданного двумя точечными зарядами q_1 и q_2.

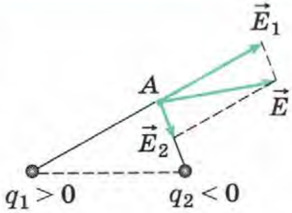


Рис. 14.16

Напряжённость. Силовые линии. Принцип суперпозиции полей | Найти

?

1. Чему равна напряжённость поля заряженного проводящего шара?
2. Чему равна напряжённость поля точечного заряда?
3. Как направлена напряжённость поля заряда q_0, если $q_0 > 0$? если $q_0 < 0$?
4. Как формулируется принцип суперпозиции полей?

§ 91 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ»

При решении задач с использованием понятия напряжённости электрического поля нужно прежде всего знать формулы (14.8) и (14.9), определяющие силу, действующую на заряд со стороны электрического поля, и напряжённость поля точечного заряда. Если поле создаётся несколькими зарядами, то для расчёта напряжённости в данной точке надо сделать рисунок и затем определить напряжённость как геометрическую сумму напряжённостей полей.

Задача 1. Два одинаковых положительных точечных заряда расположены на расстоянии r друг от друга в вакууме. Определите напряжённость электрического поля в точке, расположенной на одинаковом расстоянии r от этих зарядов.

Решение. Согласно принципу суперпозиции полей искомая напряжённость $\vec{E}$ равна геометрической сумме напряжённостей полей, созданных каждым из зарядов (рис. 14.17): $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

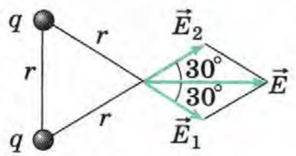


Рис. 14.17

Модули напряжённостей полей зарядов равны:

$$E_1 = E_2 = k\frac{q}{r^2}.$$

Диагональ параллелограмма, построенного на векторах $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, есть напряжённость результирующего поля, модуль которой равен:

$$E = 2E_1\cos 30^\circ = 2k\frac{q}{r^2}\frac{\sqrt{3}}{2} = k\frac{q\sqrt{3}}{r^2}.$$

Задача 2. Проводящая сфера радиусом $R = 0{,}2$ м, несущая заряд $q = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Кл, находится в вакууме. Определите: 1) модуль напряжённости $\vec{E}$ электрического поля на её поверхности; 2) модуль напряжённости $\vec{E}_1$ электрического поля в точке, отстоящей на расстоянии $r_1 = 10$ м от центра сферы; 3) модуль напряжённости $\vec{E}_0$ в центре сферы.

Решение. Электрическое поле заряженной сферы вне её совпадает с полем точечного заряда. Поэтому $E = k\frac{q}{r^2}$.

Следовательно,

1) $E = k\frac{q}{R^2} \approx 4 \cdot 10^7$ Н/Кл;

2) $E_1 = k\frac{q}{r_1^2} \approx 16 \cdot 10^3$ Н/Кл;

3) напряжённость поля в любой точке внутри проводящей сферы равна нулю: $E_0 = 0$.

Задача 3. В однородное электрическое поле напряжённостью $E_0 = 3$ кН/Кл внесли точечный заряд $q = 4 \cdot 10^{-10}$ Кл. Определите напряжённость электрического поля в точке A, находящейся на расстоянии $r = 3$ см от точечного заряда. Отрезок, соединяющий заряд и точку A, перпендикулярен силовым линиям однородного электрического поля.

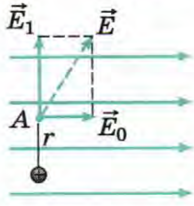


Рис. 14.18

Решение. Согласно принципу суперпозиции напряжённость электрического поля в точке A равна векторной сумме напряжённостей однородного поля E_0 и поля E_1, созданного в этой точке внесённым электрическим зарядом. На рисунке 14.18 показаны эти два вектора и их сумма. По условию задачи векторы $\vec{E}_0$ и $\vec{E}_1$ взаимно перпендикулярны. Напряжённость поля точечного заряда $E_1 = k\dfrac{q}{r^2}$. Тогда напряжённость электрического поля в точке A равна:

$$E = \sqrt{E_0^2 + \left(k\frac{q}{r^2}\right)^2} = 5\,\text{кН/Кл}.$$

Задача 4. В вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 3$ см находятся три точечных заряда $q_1 = q_2 = 10^{-9}$ Кл, $q_3 = -2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Определите напряжённость электрического поля в центре треугольника в точке O.

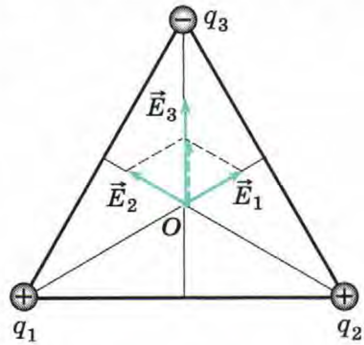


Рис. 14.19

Решение. Согласно принципу суперпозиции полей напряжённость поля в точке O равна векторной сумме напряжённостей полей, созданных каждым зарядом в отдельности: $\vec{E}_O = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$, причём $E_1 = E_2 = k\dfrac{q_1}{r^2}$, $E_3 = k\dfrac{|q_3|}{r^2}$, где $r = \dfrac{a}{2\cos 30^\circ} = \dfrac{a}{\sqrt{3}}$, $|q_3| = 2q_1$.

На рисунке 14.19 показаны векторы напряжённостей $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$. Сначала сложим векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$. Как видно из рисунка, угол между этими векторами равен 120°. Следовательно, модуль суммарного вектора равен модулю $|\vec{E}_1|$ и направлен в ту же сторону, что и вектор $\vec{E}_3$. Окончательно запишем: $E_O = E_1 + E_3 = k\dfrac{q_1}{r^2} + 2k\dfrac{q_1}{r^2} = 3k\dfrac{q_1}{r^2} = 9k\dfrac{q_1}{a^2} = 9 \cdot 10^4$ Н/Кл.

Задача 5. Расстояние между двумя неподвижными зарядами $q_1 = -2 \times 10^{-9}$ Кл и $q_2 = 10^{-9}$ Кл равно 1 м. В какой точке напряжённость электрического поля равна нулю?

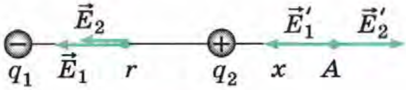


Рис. 14.20

Решение. Очевидно, что на отрезке между зарядами напряжённость не может быть равна нулю, так как напряжённости полей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, созданных этими зарядами, направлены в одну сторону (рис. 14.20).

Следовательно, напряжённость поля может быть равна нулю или справа, или слева от зарядов на линии, проходящей через эти заряды.

Так как модуль первого заряда больше, чем модуль второго, то эта точка должна находиться ближе ко второму заряду, т. е. в нашем случае справа от зарядов. Расстояние от второго заряда до точки A обозначим через x. Тогда из условия, что $|\vec{E}_1'| = |\vec{E}_2'|$, можно записать: $k\dfrac{2q_2}{(r+x)^2} = k\dfrac{q_2}{x^2}$.

Решая это уравнение, получаем $\left(\dfrac{x+r}{x}\right)^2 = 2$, $\dfrac{x+r}{x} = \pm\sqrt{2}$.

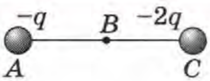
Окончательно $x = \dfrac{r}{\sqrt{2}-1} \approx 2{,}4$ м.

Задачи для самостоятельного решения

1. В направленном вертикально вниз однородном электрическом поле напряжённостью $1{,}3 \cdot 10^5$ Н/Кл капелька жидкости массой $2 \cdot 10^{-9}$ г оказалась в равновесии. Определите заряд капельки и число избыточных электронов на ней.

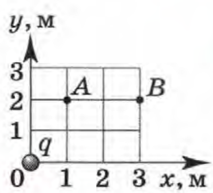
2. Точечный заряд $q = 10^{-9}$ Кл окружён сферической оболочкой из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$. Внешний и внутренний радиусы оболочки равны соответственно $R_1 = 5$ см, а $R_2 = 6$ см. Определите напряжённость $E(r)$ электрического поля в зависимости от расстояния от заряда и начертите график этой зависимости.

3. Три концентрические сферы радиусами R, $2R$ и $3R$ несут равномерно распределённые по их поверхностям заряды $q_1 = +2q$, $q_2 = -q$ и $q_3 = +q$ соответственно. Известно что точечный заряд q создаёт на расстоянии R электрическое поле напряжённостью $E_1 = 63$ Н/Кл. Чему равна напряжённость поля в точке, отстоящей от центра сфер на расстоянии, равном $2{,}5R$?



A1. Точка B находится в середине отрезка AC. Неподвижные точечные заряды $-q$ и $-2q$ расположены в точках A и C соответственно (см. рис.). Какой заряд надо поместить в точку C взамен заряда $-2q$, чтобы напряжённость электрического поля в точке B увеличилась в 2 раза?

1) $-5q$ 2) $4q$ 3) $-3q$ 4) $3q$



C2. Точечный заряд q, помещённый в начало координат, создаёт в точке A электростатическое поле напряжённостью $E_A = 65$ Н/Кл (см. рис.). Чему равна напряженность E_B в точке B?

C3. В однородном электрическом поле, вектор напряжённости которого направлен вертикально вверх, висит шарик массой 10 г и зарядом 5 мКл. При выключении поля сила натяжения нити увеличивается в два раза. Определите напряжённость поля.

§ 92 ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Изменится ли электрическое поле, если внести в него заряженный шарик? незаряженный шарик?

В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. При образовании кристаллической решётки металла электроны внешних оболочек атомов полностью утрачивают связи со своими атомами и становятся «собственностью» всего проводника в целом. В результате образовавшиеся положительно заряженные ионы оказываются окружёнными отрицательно заряженным «газом», образованным *коллективизированными* электронами.

Важно Свободные электроны участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по металлу в любом направлении.

Запомни Заряженные частицы, способные свободно перемещаться в проводнике под влиянием электрического поля, называются **свободными зарядами**.

Электростатическое поле внутри проводника. Наличие в проводнике свободных зарядов приводит к тому, что даже при наличии внешнего электрического поля внутри проводника напряжённость поля равна нулю. Если бы напряжённость электрического поля была отлична от нуля, то поле приводило бы свободные заряды в упорядоченное движение, т. е. в проводнике существовал бы электрический ток.

Интересно Утверждение об отсутствии электростатического поля внутри проводника справедливо как для заряженного проводника, так и для незаряженного, помещённого во внешнее электростатическое поле.

На примере незаряженной проводящей пластины (проводника), внесённой в однородное поле, выясним, в результате какого процесса напряжённость электростатического поля внутри проводника оказывается равной нулю (рис. 14.21). Силовые линии поля изображены сплошными линиями.

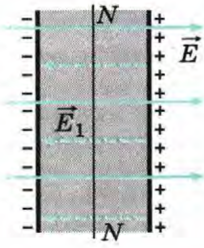


Рис. 14.21

В первый момент (при внесении пластины в поле) возникает электрический ток. Под действием электрического поля электроны пластины начинают перемещаться справа налево. Левая сторона пластины заряжается отрицательно, а правая — положительно (см. рис. 14.21). В этом состоит явление *электростатической индукции.* (Если, не убирая пластину из поля, разделить её пополам вдоль линии NN (см. рис. 14.21), то обе половины окажутся заряженными.)

Возьмите два металлических шарика и наэлектризуйте их, используя явление электростатической индукции.

Запомни Явление разделения зарядов и их распределение по поверхности проводника во внешнем электрическом поле называют **электростатической индукцией.**

Интересно Электростатического поля внутри проводника нет. На этом факте основана электростатическая защита. Чтобы защитить чувствительные к электрическому полю приборы, их помещают в металлические ящики.

Появившиеся заряды создают своё поле (линии напряжённости этого поля показаны на рисунке 14.21 штриховыми прямыми), которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его. За ничтожно малое время заряды перераспределяются так, что напряжённость результирующего поля внутри пластины становится равной нулю и движение зарядов прекращается.

Важно Силовые линии электростатического поля вне проводника в непосредственной близости к его поверхности перпендикулярны поверхности.

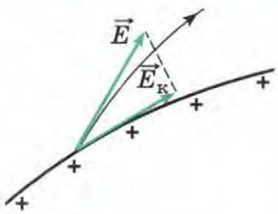


Рис. 14.22

Докажем это. Предположим, что какая-то силовая линия не перпендикулярна поверхности проводника (рис. 14.22). Это означает, что касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля не равна нулю. Следовательно, на свободные заряды действует сила, перемещающая их по поверхности проводника. Это перемещение будет происходить до тех пор, пока все силовые линии не станут перпендикулярными поверхности проводника.

Электрический заряд проводников. Внутри проводника при равновесии зарядов не только напряжённость поля равна нулю, равен нулю и заряд. Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. В самом деле, если бы внутри проводника имелся заряд, то вблизи заряда имелось бы и поле. Но электростатического поля внутри проводника нет. Следовательно,

Важно заряды в проводнике могут располагаться только на его поверхности.

Этот вывод справедлив как для незаряженных проводников в электрическом поле, так и для заряженных.

Диэлектрики в электростатическом поле. Какое влияние оказывают на электростатическое поле тела, не являющиеся проводниками? Для выяснения этого вопроса надо ближе познакомиться со строением таких тел.

У изолятора или *диэлектрика* электрические заряды, а точнее, электрически заряженные частицы — электроны и ядра в нейтральных атомах *связаны* друг с другом. Они не могут, подобно свободным зарядам проводника, перемещаться под действием электрического поля по всему объёму тела.

Различие в строении проводников и диэлектриков приводит к тому, что они поразному ведут себя в электростатическом поле. Электрическое поле может существовать внутри диэлектрика.

Интересно Изоляторы в физике обычно называют диэлектриками от греческого «диа» — через и английского «электрик» — электрический (термином «диэлектрики» обозначают вещества, через которые передаются электромагнитные взаимодействия).

Чтобы понять, как незаряженный диэлектрик создаёт электрическое поле, сначала познакомимся с электрическими свойствами нейтральных атомов и молекул.

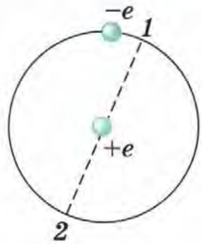


Рис. 14.23

Атомы и молекулы состоят из положительно заряженных частиц — ядер и отрицательно заряженных частиц — электронов. На рисунке 14.23 изображена схема простейшего атома — атома водорода. Положительный заряд атома (заряд ядра) сосредоточен в его центре.

Электрон движется в атоме с большой скоростью. Один оборот вокруг ядра он делает за очень малое время, порядка 10^{-15} с. Поэтому, например, уже за 10^{-9} с он успевает совершить миллион оборотов и, следовательно, миллион раз побывать в двух любых точках *1* и *2*, расположенных симметрично относительно ядра. Это даёт основание считать, что в среднем по времени центр распределения отрицательного заряда приходится на середину атома, т. е. совпадает с положительно заряженным ядром.

Однако так обстоит дело не всегда. Рассмотрим молекулу поваренной соли NaCl. Атом натрия имеет во внешней оболочке один валентный электрон, слабо связанный с атомом. У атома хлора семь валентных электронов. При образовании молекулы единственный валентный электрон натрия захватывается хлором. Оба нейтральных атома превращаются в систему из двух ионов с зарядами противоположных знаков (рис. 14.24). Положительный и отрицательный заряды не распределены теперь симметрично по объёму молекулы: центр распределения положительного заряда приходится на ион натрия, а отрицательного — на ион хлора.

Рис. 14.24

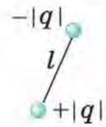


Рис. 14.25

Электрический диполь. На большом расстоянии такую молекулу можно приближённо рассматривать как электрический диполь (рис. 14.25).

Запомни **Электрическим диполем** называют систему двух равных по модулю, но противоположных по знаку зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга.

Два вида диэлектриков. Существующие диэлектрики можно разбить на два вида:

полярные, состоящие из таких молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают;

неполярные, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают. Следовательно, молекулы у этих двух видов диэлектриков разные.

К полярным диэлектрикам относятся спирты, вода и другие вещества; к неполярным — инертные газы, кислород, водород, бензол, полиэтилен и др.

Поляризация полярных диэлектриков. Полярный диэлектрик состоит из молекул, которые можно рассматривать как электрические диполи. Тепловое движение приводит к беспорядочной ориентации диполей (рис. 14.26), поэтому на поверхности диэлектрика, а также и в любом его объёме, содержащем большое число молекул (выделенный прямоугольник на рисунке 14.26), электрический заряд в среднем равен нулю. Напряжённость электрического поля в диэлектрике в среднем также равна нулю.

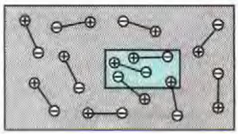


Рис. 14.26

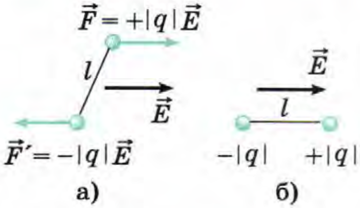


Рис. 14.27

Поместим диэлектрик в однородное электрическое поле. Со стороны этого поля на каждый электрический диполь будут действовать две силы, одинаковые по модулю, но противоположные по направлению (рис. 14.27, *а*). Они создадут момент сил, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его ось была направлена по силовым линиям поля (рис. 14.27, *б*). При этом положительные заряды смещаются в направлении электрического поля, а отрицательные — в противоположную сторону.

Запомни Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называют **поляризацией**.

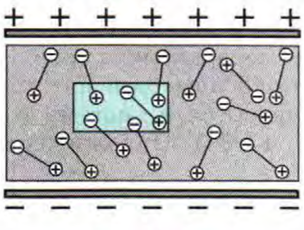


Рис. 14.28

Однако тепловое движение препятствует созданию упорядоченной ориентации всех диполей. Только при температуре, стремящейся к абсолютному нулю, все диполи выстраивались бы вдоль силовых линий. Таким образом, под влиянием поля происходит лишь частичная ориентация электрических диполей. Это означает, что в среднем число диполей, ориентированных вдоль поля, больше, чем число диполей, ориентированных против поля. На рисунке 14.28 видно, что у положительно заряженной пластины на поверхности диэлектрика появляются преимущественно отрицательные заряды диполей, а у отрицательно заряженной — положительные. В результате на поверхности диэлектрика возникает связанный заряд. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды диполей компенсируют друг друга и средний поляризованный связанный электрический заряд по-прежнему равен нулю.

Обсудите с одноклассниками вопрос о направлении силовых линий электрического поля по отношению к поверхности диэлектрика.

Поляризация неполярных диэлектриков. Неполярный диэлектрик в электрическом поле также поляризуется. Под действием поля положительные и отрицательные заряды его молекулы смещаются в противоположные стороны и центры распределения положительного и отрицательного зарядов перестают совпадать, как и у полярной молекулы. Молекулы растягиваются (рис. 14.29). Такие деформированные молекулы можно рассматривать как электрические диполи, оси которых направлены вдоль поля. На поверхностях диэлектрика, примыкающих к заряженным пластинам, появляются связанные заряды противоположного знака, как и при поляризации полярного диэлектрика.

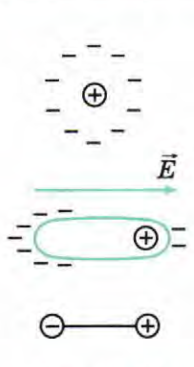


Рис. 14.29

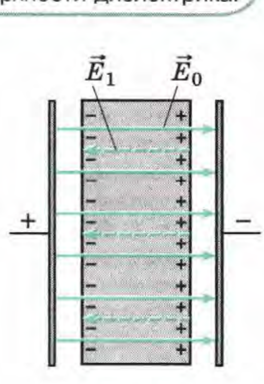


Рис. 14.30

Важно В результате поляризации возникает поле, создаваемое связанными поляризованными зарядами и направленное против внешнего поля (рис. 14.30).

Если напряжённость внешнего поля E_0, а напряжённость поля, создаваемого поляризованными зарядами, E_1, то напряжённость поля внутри диэлектрика равна:

$$E = E_0 - E_1.$$

Важно Поле внутри диэлектрика ослабляется. Степень ослабления поля зависит от свойств диэлектрика.

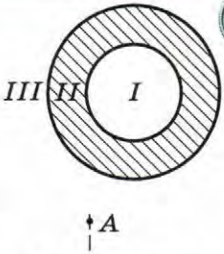
Запомни Физическая величина, равная отношению модуля напряжённости поля E_0 в вакууме к модулю напряжённости поля E в диэлектрике, называется **диэлектрической проницаемостью вещества** $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$.

С этой характеристикой среды вы уже встречались в § 85.

Проводники. Диэлектрики. Поляризация диэлектрика Найти

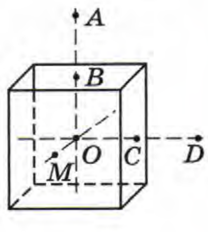
1. Чем отличаются диэлектрики от проводников?
2. Какие диэлектрики называют полярными, а какие — неполярными?
3. Что называют поляризацией диэлектрика?
4. Как диэлектрик влияет на электрическое поле?

A1. На рисунке изображено сечение уединённого проводящего полого шара. Шару сообщили отрицательный заряд. В каких областях пространства напряжённость электростатического поля, создаваемого шаром, отлична от нуля?



1) только в I
2) только во II
3) только в III
4) в I и II

B2. На неподвижном проводящем уединённом кубике (см. рис.) находится заряд Q. Точка O — центр кубика, точки B и C — центры его граней, $AB = OB$, $CD = OC$, $OM = OB/2$. Модуль напряжённости электростатического поля заряда Q в точке A равен E_A. Чему равен модуль напряжённости электростатического поля заряда Q в точке D и точке M? Установите соответствие между физическими величинами и их значениями. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и впишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.



Физическая величина	Её значение
А) Модуль напряжённости электростатического поля в точке D	1) 0 2) E_A 3) $4E_A$ 4) $16E_A$
Б) Модуль напряжённости электростатического поля в точке M	

А)	Б)

§ 93 ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ТЕЛА В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Вспомните из курса механики определение потенциальной энергии в поле силы тяжести.
Какие силы действуют на точечный заряд в электростатическом поле?
Какое поле называется однородным?

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга. При перемещении заряженных тел, например листочков электроскопа, действующие на них силы совершают работу. Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладает потенциальной энергией. Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой *электростатической* или *электрической*.

Интересно Понятие потенциальной энергии самое сложное в электростатике. Вспомните, как нелегко было представить себе, что такое потенциальная энергия в механике. Силу мы ощущаем непосредственно, а потенциальную энергию нет. На пятом этаже дома потенциальная энергия нашего тела больше, чем на первом. Но мы это никак не воспринимаем. Различие становится понятным, если вспомнить, что при подъёме вверх пришлось совершить работу, а также если представить себе, что произойдёт при падении с пятого этажа.

Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) — это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действует электрическое поле, созданное другим зарядом. При перемещении заряда действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости будем говорить просто о работе поля.) Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдём потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле. Однородное поле создают, например, большие параллельные металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд q с постоянной силой $\vec{F} = q\vec{E}$, подобно тому как Земля действует с постоянной силой $\vec{F} = m\vec{g}$ на камень вблизи её поверхности.

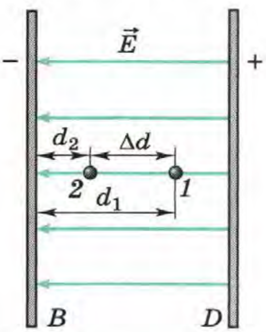


Рис. 14.31

Пусть пластины расположены вертикально (рис. 14.31), левая пластина B заряжена отрицательно, а правая — положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении положительного заряда q из точки *1*, находящейся на расстоянии d_1 от левой пластины, в точку *2*, расположенную на расстоянии d_2 от неё. Точки *1* и *2* лежат на одной силовой линии.

Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу:

$$A = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d. \tag{14.12}$$

Важно Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от формы траектории, подобно тому как не зависит от формы траектории работа силы тяжести.

Докажем это непосредственным расчётом.

Пусть перемещение заряда происходит по кривой (рис. 14.32). Разобьём эту кривую на малые перемещения. Сила, действующая на заряд, остаётся постоянной (поле однородно), а угол α между направлением силы и направлением перемещения будет изменяться. Работа на малом перемещении $\Delta\vec{s}$ равна $\Delta A = qE|\Delta\vec{s}|\cos\alpha$. Очевидно, что $|\Delta\vec{s}|\cos\alpha = \Delta d$ — проекция малого перемещения на горизонтальное направление. Суммируя работы на малых перемещениях, получаем $A = qEd$.

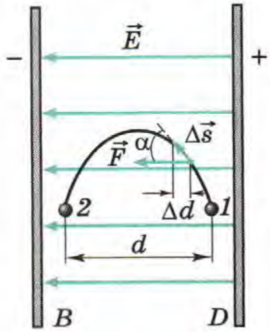


Рис. 14.32

С помощью аналогичных рассуждений можно вывести формулу для работы кулоновской силы при перемещении заряда q_0 из точки *1* в точку *2* в неоднородном поле неподвижного точечного заряда q. При этом должно быть учтено, что сила

$F = k\dfrac{q_0q}{r^2}$ зависит от расстояния до точечного заряда q. Для работы кулоновской силы в поле точечного заряда q справедливо выражение

Изобразите схематично однородное электрическое поле и начертите несколько траекторий, по которым движется заряд q. Покажите, что работа поля не зависит от траектории.

$$A = kq_0q\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Мы видим, что работа зависит только от положения начальной (r_1) и конечной (r_2) точек траектории и не зависит от формы траектории.

Электростатическая сила, действующая на заряды, является так же, как и силы тяжести, тяготения и упругости, консервативной силой.

Потенциальная энергия. Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки её приложения, сила является консервативной, и её работа согласно формуле (5.22) равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п}. \qquad (14.13)$$

Сравнивая полученное выражение (14.12) с общим определением потенциальной энергии (14.13), видим, что $\Delta W_{п} = W_{п2} - W_{п1} = -qEd$. Считаем, что в точке *2* потенциальная энергия равна нулю. Тогда

Важно потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле равна:

$$W_{п} = qEd, \qquad (14.14)$$

где d — расстояние от точки *2* до любой точки, находящейся с точкой *2* на одной силовой линии.

Теперь получим формулу для потенциальной энергии заряда, находящегося в поле точечного заряда. Изменение потенциальной энергии заряда q_0 при перемещении из точки *1* в точку *2* в неоднородном поле неподвижного точечного заряда q равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком: $\Delta W_п = -A = W_{п2} - W_{п1} = \frac{-q_0 q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$.

Если считать, что в бесконечно удалённой точке потенциальная энергия равна нулю (при $r_2 \to \infty$ $W_{п2} = 0$), то потенциальная энергия заряда q_0 в некоторой точке, находящейся на расстоянии r от точечного заряда q, создающего поле: $W_п = \frac{q_0 q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}$. Потенциальная энергия прямо пропорциональна заряду q_0, внесённому в поле.

Отметим, что формула (14.14) подобна формуле $W_п = mgh$ для потенциальной энергии тела. Но заряд q в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела при его свободном перемещении в поле в точку *2* уменьшается: $\Delta W_п < 0$. Одновременно согласно закону сохранения энергии растёт его кинетическая энергия. И наоборот, если работа отрицательна (например, при свободном движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля E; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то $\Delta W_п > 0$. Потенциальная энергия растёт, а кинетическая энергия уменьшается; частица тормозится.

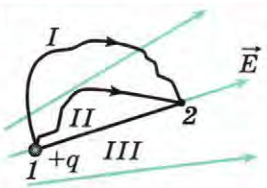
Важно На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_п = -(W_{п1} - W_{п1}) = 0.$$

Это — свойство полей консервативных сил.

Работа электростатических сил. Потенциальная энергия заряда Найти

1. Как связано изменение потенциальной энергии заряженной частицы с работой электрического поля?
2. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле?



А1. В неоднородном электростатическом поле перемещается положительный заряд из точки *1* в точку *2* по разным траекториям. В каком случае работа сил поля меньше?

1) *I*
2) *II*
3) *III*
4) работа сил электростатического поля по траекториям *I*, *II*, *III* одинакова

§ 94 ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Обладает ли электрическое поле энергией? В чём это выражается? Как рассчитать энергию поля?

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуют силой и потенциальной энергией. Электростатическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, также характеризуют двумя величинами. Напряжённость поля — это *силовая характеристика*. Теперь введём энергетическую характеристику — потенциал.

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нём заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля.

Важно На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю.

Запомни Поле, работа которого по перемещению заряда по замкнутой траектории всегда равна нулю, называют **потенциальным.**

Как называются силы, поле которых потенциально? Подумайте, почему они так называются.

Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A = -(W_{п2} - W_{п1})$ справедлива для любого электростатического поля. Но только в случае однородного поля потенциальная энергия выражается формулой (14.14).

Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу (14.14)), так и для неоднородного. Следовательно,

Важно отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещённого в поле заряда.

Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля — *потенциал*, не зависящую от заряда, помещённого в поле.

Для определения значения потенциальной энергии, как мы знаем, необходимо выбрать нулевой уровень её отсчёта. При определении потенциала поля, созданного системой зарядов, как правило, предполагается, что потенциал в бесконечно удалённой точке поля равен нулю.

Запомни **Потенциалом точки электростатического поля** называют отношение потенциальной энергии заряда, помещённого в данную точку, к этому заряду.

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_п}{q}. \quad (W_п \to 0 \text{ при } r \to \infty.) \tag{14.15}$$

Из этой формулы следует, что потенциал поля неподвижного точечного заряда q в данной точке поля, находящейся на расстоянии r от заряда, равен:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}.$$

Напряжённость поля $\vec{E}$ — векторная величина. Она представляет собой силовую характеристику поля, которая определяет силу, действующую на заряд q в данной точке поля. А потенциал φ — скаляр, это *энергетическая характеристика поля*; он определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля.

Если в примере с двумя заряженными пластинами в качестве точки с нулевым потенциалом выбрать точку на отрицательно заряженной пластине (см. рис. 14.31), то согласно формулам (14.14) и (14.15) потенциал однородного поля в точке, отстоящей на расстоянии d от неё, равен:

$$\varphi = \frac{W_п}{q} = Ed. \qquad (14.16)$$

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю.

Важно *Изменение потенциала* не зависит от выбора нулевого уровня отсчёта потенциала.

Так как потенциальная энергия $W_п = q\varphi$, то работа сил поля равна:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \qquad (14.17)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ —} \qquad (14.18)$$

разность потенциалов, т. е. разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории.

Запомни Разность потенциалов называют также **напряжением.**

Согласно формулам (14.17) и (14.18) разность потенциалов между двумя точками оказывается равной:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \qquad (14.19)$$

Важно Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда из начальной точки в конечную к этому заряду.

Если за нулевой уровень отсчёта потенциала принять потенциал бесконечно удалённой точки поля, то потенциал в данной точке равен отношению работы электростатических сил по перемещению положительного заряда из данной точки в бесконечность к этому заряду.

Единица разности потенциалов. Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы (14.19). В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд — в кулонах.

Важно Разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Эту единицу называют *вольтом* (В): 1 В = = 1 Дж/1 Кл.

Выразим единицу разности потенциалов через основные единицы СИ. Так как

$$1\ \text{В} = \frac{1\ \text{Дж}}{1\ \text{Кл}},$$

в свою очередь

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

$$1\ \text{Кл} = 1\ \text{А} \cdot 1\ \text{с},$$

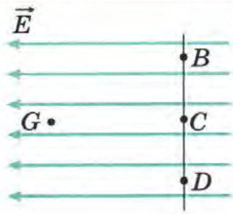
то

$$1\ \text{В} = 1\ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^3}.$$

Разность потенциалов. Потенциал электрического поля Найти

1. Какие поля называют потенциальными?
2. Как разность потенциалов между двумя точками поля зависит от работы электрического поля?
3. Что нужно выбрать сначала, прежде чем говорить о значении потенциала в данной точке поля?

A1. Выберите правильное соотношение разности потенциалов между точкой G и точками B, C и D (см. рис.) в однородном электростатическом поле.



1) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D > \varphi_G - \varphi_C$
2) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D < \varphi_G - \varphi_C$
3) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D < 0$
4) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D > 0$

A2. Работа поля по перемещению заряда $q = 10^{-5}$ Кл из одной точки в другую равна 10 Дж. Разность потенциалов между этими точками равна

1) 10^{-4} В 2) 10^{4} В 3) -10^{6} В 4) 10^{6} В

A3. Для перемещения заряда 10^{-6} Кл из точки, потенциал которой равен 2 В, в точку, потенциал которой равен 6 В, надо совершить работу, равную

1) $4 \cdot 10^{-6}$ Дж 2) $4 \cdot 10^{6}$ Дж 3) $-4 \cdot 10^{-6}$ Дж 3) $-2 \cdot 10^{6}$ Дж

§ 95 СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЁННОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Какие две характеристики электростатического поля вы уже знаете? Как они определяются?
Для чего электрическое поле изображают силовыми линиями?

Каждой точке электрического поля соответствуют определённые значения потенциала и напряжённости. Найдём связь напряжённости электрического поля с разностью потенциалов.

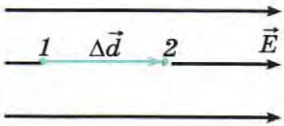


Рис. 14.33

Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряжённости однородного электрического поля $\vec{E}$ из точки *1* в точку *2*, находящуюся на расстоянии Δd от точки *1* (рис. 14.33). Электрическое поле совершает работу

$$A = qE\Delta d.$$

Эту работу согласно формуле (14.19) можно выразить через разность потенциалов между точками *1* и *2*:

> Вспомните, работу какой силы мы имеем в виду, когда говорим о работе электростатического поля.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi = qU. \qquad (14.20)$$

Приравнивая выражения для работы, найдём модуль вектора напряжённости поля:

$$\boxed{E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta d} = \frac{U}{\Delta d}.} \qquad (14.21)$$

В этой формуле U — разность потенциалов между точками *1* и *2*, лежащими на одной силовой линии поля (см. рис. 14.33).

Формула (14.21) показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd, тем меньше напряжённость электростатического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряжённость поля равна нулю.

Так как при перемещении положительного заряда в направлении вектора напряжённости $\vec{E}$ электростатическое поле совершает положительную работу

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) > 0,$$

то потенциал φ_1 больше потенциала φ_2.

Важно Напряжённость электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.

Любое электростатическое поле в достаточно малой области пространства можно считать однородным.

Формула (14.21) справедлива для произвольного электростатического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряжённости поля на этом расстоянии можно пренебречь.

Сравним поле силы тяжести и однородное электростатическое поле.

Характеристика поля	Поле силы тяжести	Однородное электростатическое поле
Сила	Сила тяжести $m\vec{g}$, консервативная сила	Электростатическая сила $q\vec{E}$, консервативная сила
Силовая характеристика	Ускорение свободного падения $\vec{g}$	Напряжённость электрического поля $\vec{E}$
Работа	Работа при перемещении тела массой m не зависит от траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории. Работа силы тяжести при перемещении тела по замкнутой траектории равна нулю	Работа при перемещении заряда q не зависит от траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек траектории. Работа электростатической силы при перемещении заряда по замкнутой траектории равна нулю
Энергия	Для определения потенциальной энергии надо выбрать нулевой уровень её отсчёта. При подъёме тела на высоту h над этим уровнем потенциальная энергия равна $W_п = mgh$	Для определения потенциальной энергии заряда в электростатическом поле надо выбрать нулевой уровень отсчёта. При смещении положительного заряда относительно нулевого уровня отсчёта в направлении, противоположном направлению напряжённости на Δd, потенциальная энергия заряда равна $W_п = qE\Delta d$
Потенциал	—	Потенциал $\varphi = \frac{A}{q} = \frac{W_п}{q}$. Считается, что на бесконечности потенциальная энергия равна нулю

Единица напряжённости электрического поля. Единицу напряжённости электрического поля в СИ устанавливают, используя формулу (14.21).

Важно Напряжённость электрического поля численно равна единице, если разность потенциалов между двумя точками, лежащими на одной силовой линии, на расстоянии 1 м в однородном поле равна 1 В.

Единица напряжённости — *вольт на метр* (В/м).

Напряжённость, как мы уже знаем, можно также выражать в ньютонах на кулон. Действительно,

$$1\,\frac{В}{м} = 1\,\frac{Дж}{Кл}\cdot\frac{1}{м} = 1\,\frac{Н\cdot м}{Кл}\cdot\frac{1}{м} = 1\,\frac{Н}{Кл}.$$

Эквипотенциальные поверхности. При перемещении заряда под углом 90° к силовым линиям электрическое поле не совершает работу, так как электростатическая сила перпендикулярна перемещению. Значит, если провести поверхность, перпендикулярную в каждой её точке силовым линиям, то при перемещении заряда вдоль этой поверхности работа не совершается. А это означает, что все точки поверхности, перпендикулярной силовым линиям, имеют один и тот же потенциал.

Запомни Поверхности равного потенциала называют **эквипотенциальными**.

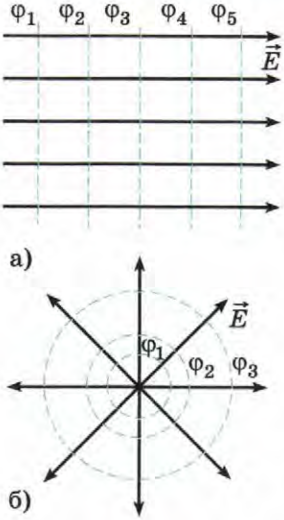


Рис. 14.34

Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости (рис. 14.34, *а*), а поля точечного заряда — концентрические сферы (рис. 14.34, *б*).

Эквипотенциальные поверхности качественно характеризуют распределение поля в пространстве подобно тому, как линии уровня отражают рельеф поверхности на географических картах. Вектор напряжённости перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону уменьшения потенциала.

Эквипотенциальные поверхности строятся обычно так, что разность потенциалов между двумя соседними поверхностями постоянна. Поэтому согласно формуле (14.21) расстояния между соседними эквипотенциальными поверхностями увеличиваются по мере удаления от точечного заряда, так как напряжённость поля уменьшается.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля расположены на равных расстояниях друг от друга.

Важно *Эквипотенциальной* является поверхность любого проводника в электростатическом поле. Ведь силовые линии перпендикулярны поверхности проводника. Причём не только поверхность, но и все точки внутри проводника имеют один и тот же потенциал. Напряжённость поля внутри проводника равна нулю, значит, равна нулю и разность потенциалов между любыми точками проводника.

Эквипотенциальные поверхности. Единицы напряжённости | Найти

1. Чему равна разность потенциалов между двумя точками заряженного проводника?
2. Как связана разность потенциалов с напряжённостью электрического поля?
3. Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряжённости поля?
4. Как строятся эквипотенциальные поверхности?
5. Как по картине эквипотенциальных поверхностей поля можно судить о значении напряжённости в различных его точках?

§ 96 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ»

При решении задач надо учитывать, что работа сил, действующих на заряд со стороны поля, выражается через разность потенциальных энергий или разность потенциалов (см. формулу (14.20)). Потенциал однородного поля определяется формулой (14.16), при этом надо всегда указывать, как выбран нулевой уровень потенциала.

Часто при решении задач надо учитывать, что все точки проводника в электростатическом поле имеют один и тот же потенциал, а напряжённость поля внутри проводника равна нулю.

Задача 1. Определите значение напряжённости и потенциала поля в точке A, находящейся на расстоянии $l = 20$ см от поверхности заряженной проводящей сферы радиусом $R = 10$ см, если потенциал сферы $\varphi_0 = 240$ В.

Решение. Напряжённость поля сферы в точке A

$$E_A = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0(R + l)^2}, \tag{1}$$

где q_0 — заряд сферы. Потенциал сферы и потенциал поля в точке A равны соответственно

$$\varphi_0 = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 R}, \tag{2}$$

$$\varphi_A = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0(R + l)}. \tag{3}$$

Выражая из формулы (2) заряд сферы q_0 и подставляя полученное выражение в формулы (1) и (3), получаем для напряжённости E_A и потенциала φ_A следующие выражения:

$$E_A = \varphi_0 R/(R + l)^2 \approx 267 \text{ Н/Кл}, \ \varphi_A = \varphi_0 R/(R + l) = 80 \text{ В}.$$

Задача 2. Какую работу A необходимо совершить, чтобы перенести заряд $q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии $l = 90$ см от поверхности сферы радиусом $R = 10$ см, если поверхностная плотность заряда сферы $\sigma = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл/м^2?

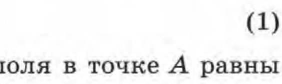


Рис. 14.35

Решение. Работа, совершаемая при перенесении заряда q из бесконечности в точку *1* (рис. 14.35), равна увеличению потенциальной энергии заряда:

$$A = \Delta W_п = W_{п1} - W_\infty.$$

Так как площадь поверхности сферы равна $4\pi R^2$, то заряд сферы равен $4\pi R^2\sigma$. Тогда потенциал поля в точке *1*

$$\varphi_1 = \frac{\sigma 4\pi R^2}{4\pi\varepsilon_0(R + l)} = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0(R + l)},$$

следовательно,

$$A = q\varphi_1 = \frac{q\sigma R^2}{\varepsilon_0(R + l)} \approx 6{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Задача 3. К закреплённому заряженному шарику зарядом $+q$ движется протон. На расстоянии $r = r_1$ скорость протона v_1. Определите, на какое минимальное расстояние приблизится протон к шарику.

Р е ш е н и е. Энергия протона на расстоянии r_1 равна сумме его потенциальной и кинетической энергий: $W_1 = k\frac{qq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2}$, на расстоянии $r_{\min}$ (протон останавливается) — только потенциальной энергии: $W_2 = k\frac{qq_p}{r_{\min}}$.

Кулоновская сила — консервативная, следовательно, можно записать закон сохранения энергии: $W_1 = W_2$, $k\frac{qq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2} = k\frac{qq_p}{r_{\min}}$, откуда

$$r_{\min} = kqq_p \Big/ \left(\frac{kqq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2}\right).$$

Задача 4. В центр незаряженной металлической сферической оболочки с внутренним радиусом R_1 и внешним радиусом R_2 помещают заряд q (рис. 14.36, *а*). Определите напряжённость и потенциал поля как функции расстояния от центра сферы.

Р е ш е н и е. Если заряд находится в центре, на внутренней поверхности металлической оболочки индуцируется заряд противоположного знака, а на внешней — того же знака, что и заряд q. При этом сумма индуцированных зарядов равна нулю (закон сохранения заряда).

Силовые линии поля начинаются на заряде q и заканчиваются на внутренней поверхности оболочки, а затем опять начинаются на внешней поверхности оболочки. Напряжённость электрического поля внутри проводника равна нулю. Картина силовых линий поля данной системы аналогична картине силовых линий поля точечного заряда за исключением области, занимаемой оболочкой. Здесь силовые линии терпят разрыв.

Итак, $E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ при $r \leqslant R_1$ и $r \geqslant R_2$,

$E = 0$ при $R_1 < r < R_2$.

На рисунке 14.36, *б* изображена зависимость напряжённости $E(r)$.

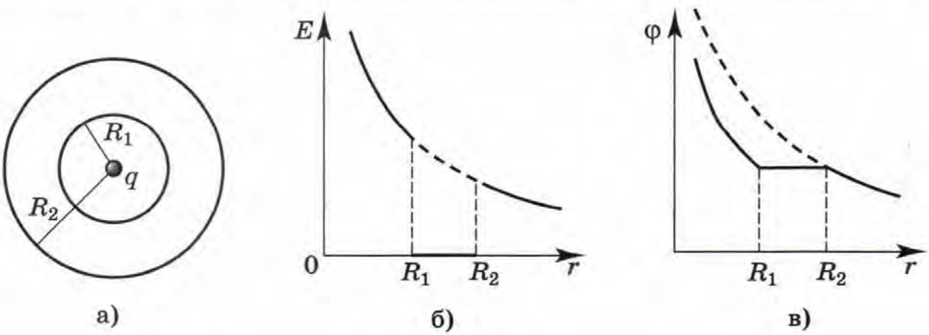


Рис. 14.36

Согласно принципу суперпозиции потенциал любой точки поля складывается из потенциала поля заряда q, проводящей сферы радиусом R_1 с зарядом $-q$ и проводящей сферы радиусом R_2 с зарядом $+q$.

При $r < R_1$ $\qquad \varphi = k\dfrac{q}{r} - k\dfrac{q}{R_1} + k\dfrac{q}{R_2} = kq\left(\dfrac{1}{r} - \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}\right).$

При $R_1 < r < R_2$ $\qquad \varphi = k\dfrac{q}{r} - k\dfrac{q}{r} + k\dfrac{q}{R_2} = k\dfrac{q}{R_2}.$

Потенциалы во всех точках проводника равны.

При $r > R_2$ $\qquad \varphi = k\dfrac{q}{r} - k\dfrac{q}{r} + k\dfrac{q}{r} = k\dfrac{q}{r}.$

На рисунке 14.36, *в* изображена зависимость потенциала $\varphi(r)$.

Задача 5. Металлический шарик радиусом $R_1 = 20$ см окружили тонкой сферической заряженной оболочкой, радиус которой $R_2 = 40$ см и заряд $q = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл (рис. 14.37). Определите потенциал оболочки и заряд шарика после того, как его заземлили.

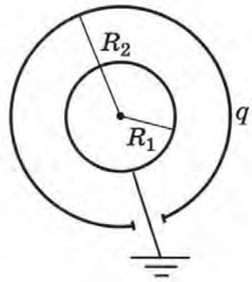


Рис. 14.37

Решение. После заземления шарика в системе будет происходить перетекание заряда до тех пор, пока потенциал шарика не станет равным нулю.

Потенциал шарика $\varphi = k\dfrac{q_x}{R_1} + k\dfrac{q}{R_2} = 0$, где q_x — заряд шарика. Отсюда $q_x = -qR_1/R_2 = -10^{-6}$ Кл.

Запишем выражение для потенциала оболочки и подставим в него выражение для заряда q_x шарика:

$$\varphi_{об} = k\frac{q}{R_2} + k\frac{q_x}{R_2} = \frac{k}{R_2}q\left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) = \frac{kq(R_2 - R_1)}{R_2^2} = 2{,}25 \cdot 10^4 \text{ В}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Электрический заряд $q_1 > 0$ переместили по замкнутому контуру $ABCD$ в поле точечного заряда $q_2 > 0$ (рис. 14.38). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? отрицательной? равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа поля по перемещению заряда?

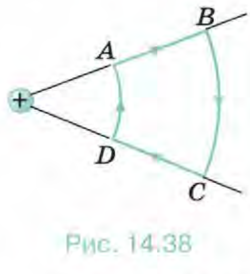


Рис. 14.38

2. Двигаясь в электрическом поле, электрон перешёл из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1 В. Насколько изменилась кинетическая энергия электрона? потенциальная энергия электрона?

3. Два одинаковых шарика, имеющие одинаковые одноимённые заряды, соединены пружиной, жёсткость которой $k = 10^3$ Н/м, а длина $l_0 = 4$ см. Шарики колеблются так, что расстояние между ними изменяется от 3 до 6 см. Определите заряды шариков.

4. Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Определите напряжённость электростатического поля, если известно, что поле однородно.

5. Изобразите эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего и равномерно заряженного цилиндра.

6. У электрона, движущегося в электрическом поле, увеличилась скорость с $v_1 \approx 1 \cdot 10^7$ м/с до $v_2 \approx 3 \cdot 10^7$ м/с. Определите разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

7. Два небольших проводящих заряженных шара радиусом r расположены на расстоянии l друг от друга ($l > 2r$). Шары поочерёдно на некоторое время заземляют. Определите потенциал шара, который был заземлён первым. Первоначально каждый шар имел заряд q.

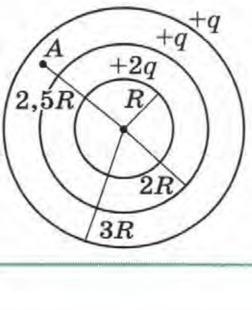
А1. Заряженная пылинка движется между двумя одинаковыми заряженными вертикальными пластинами, расположенными напротив друг друга. Разность потенциалов между пластинами 500 В, масса пылинки столь мала, что силой тяжести можно пренебречь. Какую кинетическую энергию приобретает пылинка при перемещении от одной пластины до другой, если её заряд 4 нКл?

1) 2 мкДж 2) 1 мкДж 3) 4 мкДж 4) 0,08 мкДж

А2. Заряженная пылинка движется вертикально между двумя одинаковыми горизонтальными пластинами размером 5×5 см, расположенными напротив друг друга на расстоянии 0,5 см, разность потенциалов между которыми 300 В. Её кинетическая энергия при перемещении от одной пластины до другой изменяется на 1,5 мкДж. Чему равен заряд пылинки? Силу тяжести не учитывайте.

1) 10 нКл 2) 1,5 нКл 3) 5 нКл 4) 0,25 нКл

С3. Песчинка, имеющая заряд 10^{-11} Кл, влетела в однородное электрическое поле вдоль его силовых линий с начальной скоростью 0,1 м/с и переместилась на расстояние 4 см. Чему равна масса песчинки, если её скорость увеличилась на 0,2 м/с при напряжённости поля 10^5 В/м? Силу тяжести не учитывайте.



С4. Три концентрические сферы радиусами R, $2R$ и $3R$ (см. рис.) имеют равномерно распределённые по их поверхностям заряды $q_1 = +2q$, $q_2 = +q$, $q_3 = +q$ соответственно. Известно, что точечный заряд q создаёт на расстоянии R электрическое поле с потенциалом $\varphi_1 = 100$ В. Чему равен потенциал в точке A, отстоящей от центра сфер на расстоянии $R_A = 2{,}5R$?

§ 97 ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ. КОНДЕНСАТОР

Предположите, при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд.

При электризации двух проводников между ними появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением заряда проводников электрическое поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле возможен так называемый *пробой* диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение и соответственно напряжённость поля между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Запомни Физическая величина, характеризующая способность проводников накапливать электрический заряд, называется **электроёмкостью.**

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном $+q$, а на другом $-q$). Действительно, если заряды удвоить, то напряжённость электрического поля станет в 2 раза больше, соответственно в 2 раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда из одной точки поля в другую, т. е. в 2 раза увеличится напряжение. Поэтому

Важно отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов между проводниками не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это позволяет ввести понятие электроёмкости двух проводников.

Запомни **Электроёмкостью двух проводников** называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \tag{14.22}$$

Электроёмкость уединённого проводника равна отношению заряда проводника к его потенциалу, если все другие проводники бесконечно удалены и потенциал бесконечно удалённой точки равен нулю.

Чем больше электроёмкость, тем больший заряд скапливается на проводниках при одном и том же напряжении. Обратим внимание, что сама электроёмкость не зависит ни от сообщённых проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единицей электроёмкости в СИ является фарад.

Важно **1 фарад** — это электроёмкость двух проводников в том случае, если при сообщении им зарядов +1 Кл и –1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В: 1 Ф = 1 Кл/В.

Из-за того что заряд в 1 Кл очень велик, ёмкость 1 Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) — 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) — 10^{-12} Ф.

Конденсатор.

Запомни Устройства для накопления электрического заряда называются **конденсаторами.**

Интересно Слово «конденсатор» в переводе на русский язык означает «сгуститель». В данном случае — «сгуститель электрического поля».

Конденсатор представляет собой два проводника, разделённые слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

Запомни Проводники конденсатора называются **обкладками**.

Простейший *плоский конденсатор* состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 14.39).

Важно Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной. Поэтому почти всё электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора и однородно.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также первую обкладку соединить с полюсом батареи, у которой другой полюс заземлён, а вторую обкладку конденсатора заземлить. Тогда на заземлённой обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземлённой обкладки. Такой же по модулю заряд уйдёт в землю.

Интересно Заземление проводников — это соединение их с землёй (очень большим проводником) с помощью металлических листов в земле, водопроводных труб и т. д.

Важно Под *зарядом конденсатора* понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Рис. 14.39

Электроёмкость конденсатора определяется формулой (14.22).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому электроёмкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Электроёмкость плоского конденсатора. Геометрические характеристики плоского конденсатора полностью определяются площадью S его пластин и расстоянием d между ними. От этих величин и должна зависеть ёмкость плоского конденсатора.

Чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить: $q \sim S$. Напряжение же между пластинами согласно формуле (14.21, с. 314) пропорционально расстоянию между ними. Поэтому ёмкость

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{S}{d}. \qquad (14.23)$$

Кроме того, ёмкость конденсатора зависит от свойств диэлектрика между пластинами. Так как диэлектрик ослабляет поле, то электроёмкость при наличии диэлектрика увеличивается: $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Проверьте на опыте зависимость электроёмкости конденсатора от его геометрических характеристик. Для этого возьмите две металлические плоские пластины и зарядите одну из них (например, потрите о шёлк стеклянную палочку), приблизьте другую пластину к ней и затем заземлите её. Соедините пластины с вольтметром. Уменьшайте расстояние между пластинами и следите за изменением показаний вольтметра. Сдвигайте пластины друг относительно друга и также следите за изменением показаний вольтметра. Сделайте выводы.

Последовательное и параллельное соединения конденсаторов. На практике конденсаторы часто соединяют различными способами. На рисунке 14.40 представлено последовательное соединение трёх конденсаторов. Если точки *1* и *2* подключить к источнику напряжения, то на левую пластину конденсатора $C1$ перейдёт заряд $+q$, на правую пластину конденсатора $C3$ — заряд $-q$. Вследствие электростатической индукции правая пластина конденсатора $C1$ будет иметь заряд $-q$, а так как пластины конденсаторов $C1$ и $C2$ соединены и до подключения напряжения были электронейтральны, то по закону сохранения заряда на левой пластине конденсатора $C2$ появится заряд $+q$ и т. д. На всех пластинах конденсаторов при таком соединении будет одинаковый по модулю заряд:

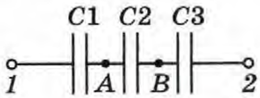


Рис. 14.40

$$q = q_1 = q_2 = q_3.$$

Важно Определить эквивалентную электроёмкость — это значит определить электроёмкость такого конденсатора, который при той же разности потенциалов будет накапливать тот же заряд q, что и система конденсаторов.

Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ складывается из суммы разностей потенциалов между пластинами каждого из конденсаторов:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (\varphi_1 - \varphi_A) + (\varphi_A - \varphi_B) + (\varphi_B - \varphi_2), \text{ или } U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Воспользовавшись формулой (14.23), запишем:

$$\frac{q}{C_{\text{экв}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3},$$

откуда $\frac{1}{C_{\text{экв}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$, и в общем случае

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = \sum_i \frac{1}{C_i}.$$

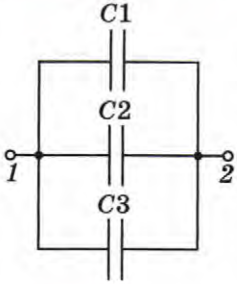


Рис. 14.41

На рисунке 14.41 представлена схема *параллельно соединённых* конденсаторов. Разность потенциалов между пластинами всех конденсаторов одинакова и равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Заряды на пластинах конденсаторов

$$q_1 = C_1U,\ q_2 = C_2U,\ q_3 = C_3U.$$

На эквивалентном конденсаторе ёмкостью $C_{\text{экв}}$ заряд на пластинах при той же разности потенциалов

$$q = q_1 + q_2 + q_3.$$

Для электроёмкости, согласно формуле (14.23) запишем: $C_{\text{экв}}U = C_1U + C_2U + C_3U$, следовательно, $C_{\text{экв}} = C_1 + C_2 + C_3$, и в общем случае $C_{\text{экв}} = \sum_i C_i$.

Различные типы конденсаторов. В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок алюминиевой фольги, изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свёрнуты в пакет небольшого размера.

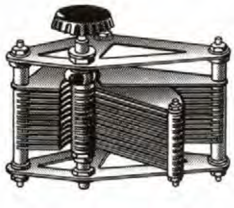


Рис. 14.42

В радиотехнике широко применяют конденсаторы переменной электроёмкости (рис. 14.42). Такой конденсатор состоит из двух систем металлических пластин, которые при вращении рукоятки могут входить одна в другую. При этом меняются площади перекрывающихся частей пластин и, следовательно, их электроёмкость. Диэлектриком в таких конденсаторах служит воздух. Сейчас во многих устройствах электроёмкость конденсаторов регулируется электронными устройствами.

Рис. 14.43

Значительного увеличения электроёмкости за счёт уменьшения расстояния между обкладками достигают в так называемых электролитических конденсаторах (рис. 14.43). Диэлектриком в них служит очень тонкая плёнка оксидов, покрывающих одну из обкладок (полосу фольги). Другой обкладкой служит бумага, пропитанная раствором специального вещества (электролита).

Электроёмкость. Конденсатор. Виды конденсаторов | Найти

1. Что называют электроёмкостью двух проводников?
2. Почему понятие электроёмкости неприменимо к диэлектрикам?
3. От чего зависит электроёмкость?
4. Как изменяется ёмкость конденсатора при наличии диэлектрика между его обкладками?
5. Какие существуют типы конденсаторов?
6. Какую роль выполняют конденсаторы в технике?

§ 98 ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Влияет ли расположение окружающих тел на электроёмкость проводника?
От чего зависит электроёмкость проводника?
Обладает ли электрическое поле конденсатора энергией?

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа не пропадает, а идёт на увеличение энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в несколько вольт (рис. 14.44). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию излучения.

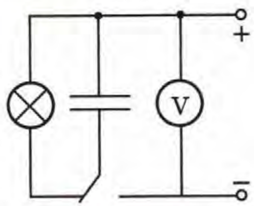


Рис. 14.44

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора.

Напряжённость поля, созданного зарядом одной из пластин, равна $E/2$, где E — напряжённость поля в конденсаторе. В однородном поле одной пластины находится заряд q, распределённый по поверхности другой пластины (рис. 14.45). Согласно формуле (14.14) потенциальная энергия заряда в однородном поле равна:

$$W_п = q\frac{E}{2}d, \qquad (14.24)$$

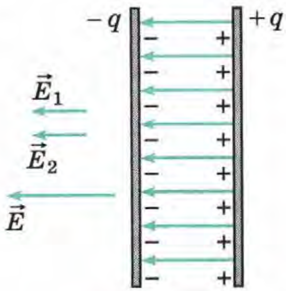


Рис. 14.45

где q — заряд конденсатора, а d — расстояние между пластинами.

Так как $Ed = U$, где U — разность потенциалов между обкладками конденсатора, то его энергия равна:

$$W_п = \frac{qU}{2}. \qquad (14.25)$$

Если заряд на пластинах остаётся постоянным, при сближении пластин поле совершает положительную работу: $A = W_{п2} - W_{п1} = \frac{q(U_2 - U_1)}{2}$, $U_2 > U_1$. При этом энергия электрического поля уменьшается.

Заменив в формуле (14.25) разность потенциалов или заряд с помощью выражения (14.22) для электроёмкости конденсатора, получим

$$\boxed{W_п = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.} \qquad (14.26)$$

Можно доказать, что эти формулы справедливы для любого конденсатора, а не только для плоского.

Энергия электрического поля. Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Значит, энергия может быть выражена через основную характеристику поля — напряжённость.

Так как напряжённость электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов ($U = Ed$), то для энергии можно записать формулу

$$W_п = \frac{CU^2}{2} = \frac{CE^2d^2}{2}.$$

Важно Энергия конденсатора прямо пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля внутри его: $W_п \sim E^2$.

Применение конденсаторов. Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется при создании одного из типов клавиатур компьютера. На тыльной стороне каждой клавиши располагается одна пластина конденсатора, а на плате, расположенной под клавишами, — другая. Нажатие клавиши изменяет ёмкость конденсатора. Электронная схема, подключённая к этому конденсатору, преобразует сигнал в соответствующий код, передаваемый в компьютер.

Энергия конденсатора обычно не очень велика — не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторы в качестве источников электрической энергии. Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энергии не получили практического применения. Конденсаторы могут накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке через цепь с малым сопротивлением они отдают энергию почти мгновенно. Именно это свойство широко используют на практике.

Лампа-вспышка, применяемая в фотографии, питается электрическим током разряда конденсатора, заряжаемого предварительно специальной батареей. Возбуждение квантовых источников света — лазеров осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой электроёмкости. Однако основное применение конденсаторы находят в радиотехнике.

Энергия конденсатора. Применение конденсаторов Найти

1. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
2. Перечислите основные области применения конденсаторов.

А1. Как изменится энергия электрического поля конденсатора, если заряд на его обкладках уменьшить в 2 раза?

1) не изменится
2) уменьшится в 2 раза
3) уменьшится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза

А2. Конденсатор подключён к источнику постоянного напряжения. Как изменится энергия электрического поля внутри конденсатора, если увеличить в 2 раза расстояние между обкладками конденсатора?

1) не изменится
2) увеличится в 2 раза
3) уменьшится в 2 раза
4) правильный ответ не приведён

§ 99 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ. ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА»

«Электроёмкость» — последняя тема раздела «Электростатика». При решении задач на эту тему могут потребоваться все сведения, полученные при изучении электростатики: закон сохранения электрического заряда, понятия напряжённости поля и потенциала, сведения о поведении проводников в электростатическом поле, о напряжённости поля в диэлектриках, о законе сохранения энергии применительно к электростатическим явлениям. Основной формулой при решении задач на электроёмкость является формула (14.22).

Задача 1. Электроёмкость конденсатора, подключённого к источнику постоянного напряжения $U = 1000$ В, равна $C_1 = 5$ пФ. Расстояние между его обкладками уменьшили в $n = 3$ раза. Определите изменение заряда на обкладках конденсатора и энергии электрического поля.

Р е ш е н и е. Согласно формуле (14.22) заряд конденсатора $q = CU$.

Отсюда изменение заряда $\Delta q = (C_2 - C_1)U = (nC_1 - C_1)U = (n - 1)C_1U = 10^{-8}$ Кл.

Изменение энергии электрического поля

$$\Delta W_{\text{п}} = W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1} = \frac{q_2U}{2} - \frac{q_1U}{2} = \frac{(q_2 - q_1)U}{2} = \frac{(n-1)C_1U^2}{2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Задача 2. Заряд конденсатора $q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл. Ёмкость конденсатора $C = 10$ пФ. Определите скорость, которую приобретает электрон, пролетая в конденсаторе путь от одной пластины к другой. Начальная скорость электрона равна нулю. Удельный заряд электрона $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Р е ш е н и е. Начальная кинетическая энергия электрона равна нулю, а конечная равна $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$. Применим закон сохранения энергии $\frac{mv^2}{2} - 0 = A$, где A — работа электрического поля конденсатора: $A = |e|U$, $U = \frac{q}{C}$.

Следовательно, $\frac{mv^2}{2} = \frac{|e|q}{C}$.

Окончательно $v = \sqrt{\frac{2|e|q}{mC}} \approx 10^7$ м/с.

Задача 3. Четыре конденсатора ёмкостями $C_1 = C_2 = 1$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ, $C_4 = 2$ мкФ соединены, как показано на рисунке 14.46. К точкам A и B подводится напряжение $U = 140$ В. Определите заряд q_i и напряжение U_i на каждом из конденсаторов.

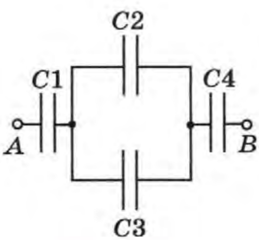


Рис. 14.46

Р е ш е н и е. Для определения заряда и напряжения прежде всего найдём ёмкость батареи конденсаторов.

Эквивалентная ёмкость второго и третьего конденсаторов $C_{2,3} = C_2 + C_3$, а эквивалентную ёмкость всей батареи конденсаторов, представляющей собой три последовательно соединённых конденсатора ёмкостями C_1, $C_{2,3}$, C_4, найдём из соотношения

$$1/C_{\text{экв}} = 1/C_1 + 1/C_{2,3} + 1/C_4,\ C_{\text{экв}} = (4/7) \cdot 10^{-6}\ \text{Ф}.$$

Заряды на этих конденсаторах одинаковы:

$$q_1 = q_{2,3} = q_4 = C_{\text{экв}}U = 8 \cdot 10^{-5}\ \text{Кл}.$$

Следовательно, заряд первого конденсатора $q_1 = 8 \cdot 10^{-5}$ Кл, а разность потенциалов между его обкладками, или напряжение, $U_1 = q_1/C_1 = 80$ В.

Для четвёртого конденсатора аналогично имеем $q_4 = 8 \cdot 10^{-5}$ Кл, $U_4 = q_4/C_4 = 40$ В.

Найдём напряжение на втором и третьем конденсаторах: $U_2 = U_3 = q_{2,3}/C_{2,3} = 20$ В.

Таким образом, на втором конденсаторе заряд $q_2 = C_2U_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ Кл, а на третьем конденсаторе $q_3 = C_3U_3 = 6 \cdot 10^{-5}$ Кл. Отметим, что $q_{2,3} = q_2 + q_3$.

Задача 4. Определите эквивалентную электрическую ёмкость в цепи, изображённой на рисунке 14.47 *а*, если ёмкости конденсаторов известны.

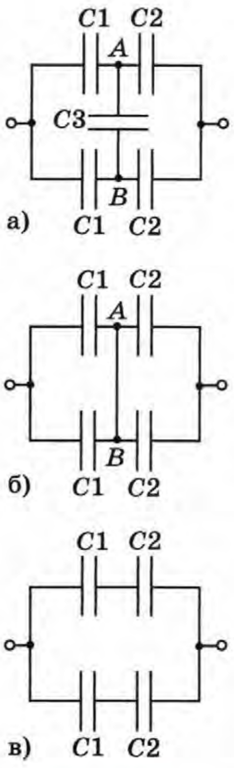


Рис. 14.47

Р е ш е н и е. Часто при решении задач, в которых требуется определить эквивалентную электрическую ёмкость, соединение конденсаторов не очевидно. В этом случае если удаётся определить точки цепи, в которых потенциалы равны, то можно соединить эти точки или исключить конденсаторы, присоединённые к этим точкам, так как они не могут накапливать заряд ($\Delta\varphi = 0$) и, следовательно, не играют роли при распределении зарядов.

В приведённой на рисунке 14.47, *а* схеме нет очевидного параллельного или последовательного соединения конденсаторов, так как в общем случае $\varphi_A \neq \varphi_B$ и к конденсаторам $C1$ и $C2$ приложены разные напряжения. Однако заметим, что в силу симметрии и равенства ёмкостей соответствующих конденсаторов потенциалы точек A и B равны. Следовательно, можно, например, соединить точки A и B. Схема преобразуется к виду, изображённому на рисунке 14.47, *б*. Тогда конденсаторы $C1$, так же как и конденсаторы $C2$, будут соединены параллельно и $C_{\text{экв}}$ определим по формуле $1/C_{\text{экв}} = 1/2C_1 + 1/2C_2$, откуда

$$C_{\text{экв}} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Можно также просто не учитывать присутствие в схеме конденсатора $C3$, так как заряд на нём равен нулю. Тогда схема преобразуется к виду, изображённому на рисунке 14.47, *в*. Конденсаторы $C1$ и $C2$ соединены последовательно, следовательно,

$$C'_{экв} = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Эквивалентные конденсаторы с $C'_{экв}$ соединены параллельно, так что окончательно получим такое же выражение для эквивалентной ёмкости:

$$C_{экв} = 2C'_{экв} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Задача 5. Энергия плоского воздушного конденсатора $W_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж. Определите энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$, если:
1) конденсатор отключён от источника питания;
2) конденсатор подключён к источнику питания.

Решение. 1) Так как конденсатор отключён от источника питания, то его заряд q_0 остаётся постоянным. Энергия конденсатора до заполнения его диэлектриком $W_1 = \frac{q_0^2}{2C_1}$; после заполнения $W_2 = \frac{q_0^2}{2C_2}$, где $C_2 = \varepsilon C_1$.

Тогда $W_2 = \frac{q_0^2}{2\varepsilon C_1} = \frac{W_1}{\varepsilon} = 10^{-7}$ Дж.

2) Так как конденсатор подключён к источнику питания, то напряжение U_0 на нём остаётся постоянным. Тогда для энергии до заполнения диэлектриком запишем формулу $W_1 = \frac{C_1U_0^2}{2}$; после заполнения — $W_2 = \frac{C_2U_0^2}{2}$, где $C_2 = \varepsilon C_1$.

Тогда $W_2 = \frac{\varepsilon C_1 U_0^2}{2} = \varepsilon W_1 = 4 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Задачи для самостоятельного решения

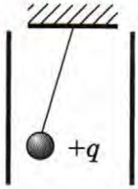
1. Разность потенциалов между обкладками конденсатора ёмкостью 0,1 мкФ изменилась на 175 В. Определите изменение заряда конденсатора.

2. В пространство между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с, направленной параллельно пластинам конденсатора. На какое расстояние по направлению к положительно заряженной пластине сместится электрон за время движения внутри конденсатора, если длина конденсатора равна 0,05 м и разность потенциалов между пластинами 200 В? Расстояние между пластинами конденсатора равно 0,02 м. Отношение модуля заряда электрона к его массе равно $1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

3. Плоский конденсатор зарядили при помощи источника тока напряжением $U = 200$ В. Затем конденсатор был отключён от этого источника тока. Каким станет напряжение U_1 между пластинами, если расстояние между ними увеличить от первоначального $d = 0{,}2$ мм до $d_1 = 0{,}7$ мм?

4. Определите ёмкость воздушного сферического конденсатора. Радиусы сфер R_1 и R_2.

5. В плоский воздушный конденсатор вставляется металлическая пластина толщиной d_0. Заряд на обкладках конденсатора q. Конденсатор отключён от источника. Расстояние между пластинами d, площадь пластин S. Определите изменение ёмкости конденсатора и энергии его электрического поля.



С1. Маленький шарик с зарядом $q = 4 \cdot 10^{-7}$ Кл и массой 3 г, подвешенный на невесомой нити с коэффициентом упругости 100 Н/м, находится между вертикальными пластинами воздушного конденсатора (см. рис.). Расстояние между обкладками конденсатора 5 см. Чему равна разность потенциалов между обкладками конденсатора, если удлинение нити 0,5 мм?

С2. В плоский конденсатор длиной $L = 5$ см влетает электрон под углом $\alpha = 15°$ к пластинам. Энергия электрона $W = 2{,}4 \cdot 10^{-16}$ Дж. Расстояние между пластинами $d = 1$ см. Определите разность потенциалов между пластинами конденсатора U, при которой электрон на выходе из конденсатора будет двигаться параллельно пластинам. Заряд электрона $q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

С3. Конденсаторы, электрическая ёмкость которых 2 мкФ и 10 мкФ, заряжают до напряжения 5 В каждый, а затем «плюс» одного из них подключают к «минусу» другого и соединяют свободные выводы резистором 1000 Ом. Определите количество теплоты, которая выделится в резисторе.

Повторите материал главы 14 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Статическое электричество»

1. История открытия электричества (Франклин, Гальвани, Вольта и др.).
2. Скалярные и векторные поля. Сравнение электрического поля заряженной сферы и гравитационного поля Земли.
3. Диэлектрики (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры и т. д.).
4. Статическое электричество. Электризация тел в быту и на производстве. Способы защиты от статического электричества.

«Изготовление цилиндрического конденсатора. Исследование зависимости его электроёмкости от геометрических параметров и от наличия диэлектрика между пластинами. Определение электроёмкости конденсатора по зависимости *q*(*U*)»

ГЛАВА 15 ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц. Благодаря электрическому току освещаются квартиры, приводятся в движение станки, нагреваются конфорки на электроплитах, работает радиоприемник и т. д.

Рассмотрим наиболее простой случай направленного движения заряженных частиц — постоянный ток.

§ 100 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА

Какой электрический заряд называется элементарным?
Чему равен элементарный электрический заряд?
Чем различаются заряды в проводнике и диэлектрике?

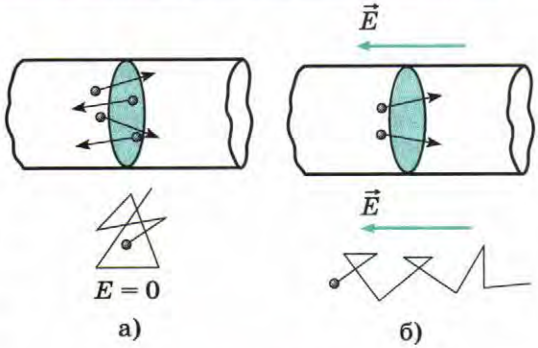


Рис. 15.1

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда из одной точки в другую. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, *свободные электроны в металле*, то переноса заряда не происходит (рис. 15.1, *а*). Поперечное сечение проводника в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд переносится через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении (рис. 15.1, *б*). В этом случае говорят, что по проводнику идёт *электрический ток*.

Запомни **Электрическим током** называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Электрический ток имеет определённое направление.

Важно За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

Интересно Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд, переносимый через любое сечение, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

Направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных

Интересно Выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

Действие тока. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, проводник, по которому идёт ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника: например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Это действие тока называется *магнитным*.

Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

Соберите цепь, состоящую из источника (батарейки), реостата, лампочки и ключа. Поднесите компас к реостату сверху. Заметьте, как ориентирована стрелка компаса. Замкните ключ. Изменилась ли ориентация стрелки компаса? Сделайте вывод.

В лампочке накаливания вследствие прохождения электрического тока излучается видимый свет, а электродвигатель совершает механическую работу.

Сила тока. Если в цепи идёт электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

Запомни Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока.**

Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq, то среднее значение силы тока равно:

$$\boxed{I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.} \qquad (15.1)$$

Важно Средняя сила тока равна отношению заряда Δq, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt, к этому промежутку времени.

Запомни Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным.**

Сила переменного тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени Δt в таком случае должен быть очень мал.

Сила тока, подобно заряду, — величина скалярная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений обхода контура принять за положительное. Сила тока $I > 0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае $I < 0$.

Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц. Пусть цилиндрический проводник (рис. 15.2) имеет поперечное сечение площадью S. За положительное направление тока в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным q_0. В объёме проводника, ограниченном поперечными сечениями *1* и *2* с расстоянием Δl между ними, содержится $nS\Delta l$ частиц, где n — концентрация частиц (носителей тока). Их общий заряд в выбранном объёме $q = q_0 nS\Delta l$. Если частицы движутся слева направо со средней скоростью v, то за время $\Delta t = \dfrac{\Delta l}{v}$ все частицы, заключённые в рассматриваемом объёме, пройдут через поперечное сечение *2*. Поэтому сила тока равна: $I = \dfrac{\Delta q}{\Delta t} = \dfrac{q_0 nS\Delta l v}{\Delta l} = q_0 nvS.$ (15.2)

Интересно

Термин *сила тока* нельзя считать удачным, так как понятие *сила*, применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию *сила* в механике. Но термин *сила тока* был введён давно и утвердился в науке.

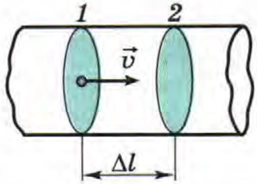


Рис. 15.2

Важно В СИ единицей силы тока является *ампер* (А).

Эта единица установлена на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока *амперметрами*. Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Найдём скорость упорядоченного перемещения электронов в металлическом проводнике. Согласно формуле (15.2) $v = \dfrac{I}{enS}$, где e — модуль заряда электрона.

Определите среднюю квадратичную скорость теплового движения свободных электронов, рассматривая электронный газ как идеальный. ($\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\dfrac{3kT}{m}}$, где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.) Сделайте вывод.

Пусть, например, сила тока $I = 1$ А, а площадь поперечного сечения проводника $S = 10^{-6}$ м^2. Модуль заряда электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Число электронов в 1 м^3 меди равно числу атомов в этом объёме, так как один из валентных электронов каждого атома меди является свободным. Это число есть $n \approx 8{,}5 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$ (это число можно определить, если решить задачу 6 из § 54). Следовательно,

$$v = \frac{1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 8{,}5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \text{ (м/с)} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

Как видите, скорость упорядоченного перемещения электронов очень мала. Она во много раз меньше скорости теплового движения электронов в металле.

Условия, необходимые для существования электрического тока.

Важно Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо *наличие свободных заряженных частиц*.

Однако этого ещё недостаточно для возникновения тока.

Важно Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима *сила*, действующая на них в определённом направлении.

Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за столкновений с ионами кристаллической решётки металлов или нейтральными молекулами электролитов и электроны будут двигаться беспорядочно.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Важно Обычно именно электрическое поле внутри проводника служит причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц. Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника равно нулю.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника в соответствии с формулой (14.21) существует разность потенциалов. Как показал эксперимент, когда разность потенциалов не меняется во времени, в проводнике устанавливается *постоянный электрический ток*. Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального на другом, так как положительный заряд под действием сил поля перемещается в сторону убывания потенциала.

Сила тока. Электронная теория проводимости Найти

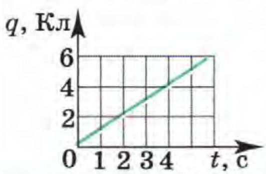
1. Что определяет среднюю скорость дрейфа свободных электронов?
2. Почему единицу тока определяют по магнитному взаимодействию?

А1. Время рабочего импульса ускорителя электронов равно 1 мкс. Средняя сила тока, создаваемого этим ускорителем, 32 кА. Определите число электронов, ускоряемых за один пуск ускорителя. Заряд электрона $q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1) $4 \cdot 10^{16}$ 2) $8 \cdot 10^{17}$ 3) 10^{17} 4) $2 \cdot 10^{17}$

А2. На электроды вакуумного диода подаётся переменное напряжение, в результате чего сила тока, проходящего через этот диод, равномерно увеличивается за 2 мкс от 0 до 12 А. Определите заряд, который прошёл через диод за это время.

1) 36 мкКл 2) 12 мкКл 3) 36 мКл 4) $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



А3. По проводнику идёт постоянный электрический ток. Значение заряда, прошедшего через проводник, возрастает с течением времени согласно графику, представленному на рисунке. Сила тока в проводнике равна

1) 36 А
2) 16 А
3) 6 А
4) 1 А

§101 ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ

Что заставляет заряды двигаться вдоль проводника?
Как электрическое поле действует на заряды?

Вольт-амперная характеристика. В предыдущем параграфе говорилось, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике и, следовательно, тем бо́льшую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно формуле (15.2) это означает увеличение силы тока.

Г. Ом
(1787—1854)

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого и газообразного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника.

Запомни Зависимость силы тока в проводнике от напряжения, подаваемого на него, называют **вольт-амперной характеристикой** проводника.

Её находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при изучении электрического тока.

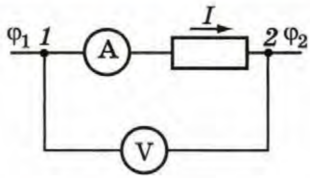


Рис. 15.3

Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) её установил немецкий учёный Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название *закона Ома.*

На участке цепи, изображённой на рисунке 15.3, ток направлен от точки *1* к точке *2*. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Так как ток направлен слева направо, то напряжённость электрического поля направлена в ту же сторону и $\varphi_1 > \varphi_2$.

Измеряя силу тока амперметром, а напряжение вольтметром, можно убедиться в том, что сила тока прямо пропорциональна напряжению.

Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка R:

$$I = \frac{U}{R}. \tag{15.3}$$

Применение обычных приборов для измерения напряжения — вольтметров — основано на законе Ома. Принцип устройства вольтметра такой же, как и у амперметра. Угол поворота стрелки прибора пропорционален силе тока.

Сила тока, проходящего по вольтметру, определяется напряжением между точками цепи, к которой он подключён. Поэтому, зная сопротивление вольтметра, можно по силе тока определить напряжение. На практике прибор градуируют так, чтобы он сразу показывал напряжение в вольтах.

Сопротивление. Основная электрическая характеристика проводника — *сопротивление.* От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении.

Запомни Свойство проводника ограничивать силу тока в цепи, т. е. противодействовать электрическому току, называют **электрическим сопротивлением проводника.**

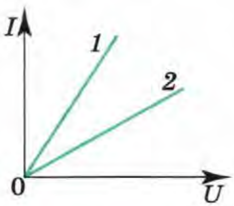


Рис. 15.4

С помощью закона Ома (15.3) можно определить сопротивление проводника: $R = \frac{U}{I}$.

Для этого нужно измерить напряжение на концах проводника и силу тока в нём.

На рисунке 15.4 приведены графики вольт-амперных характеристик двух проводников. Очевидно, что сопротивление проводника, которому соответствует график *2*, больше, чем сопротивление проводника, которому соответствует график *1*.

Важно Сопротивление проводника не зависит от напряжения и силы тока.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной l с постоянной площадью поперечного сечения S равно:

$$R = \rho\frac{l}{S}, \qquad (15.4)$$

где ρ — величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь).

Величину ρ называют *удельным сопротивлением проводника.*

Удельное сопротивление материала численно равно сопротивлению проводника из этого материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2.

Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют её омом.

Важно Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока в нём 1 А.

Выведите зависимость силы тока от длины проводника. Начертите график этой зависимости.

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом · м. Удельное сопротивление металлов мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. Например, удельное сопротивление серебра $1{,}59 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, а стекла порядка 10^{10} Ом · м. В справочных таблицах приводятся значения удельного сопротивления некоторых веществ.

Значение закона Ома. Из закона Ома следует, что при заданном напряжении сила тока на участке цепи тем больше, чем меньше сопротивление этого участка. Если по какой-то причине (нарушение изоляции близко расположенных проводов, неосторожные действия при работе с электропроводкой и пр.) сопротивление между двумя точками, находящимися под напряжением, оказывается очень малым, то сила тока резко возрастает (возникает короткое замыкание), что может привести к выходу из строя электроприборов и даже возникновению пожара.

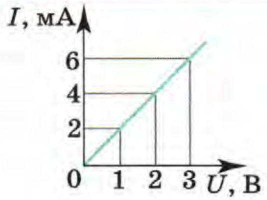
Именно из-за закона Ома нельзя говорить, что чем выше напряжение, тем оно опаснее для человека. Сопротивление человеческого тела может сильно изменяться в зависимости от условий (влажности, температуры окружающей среды, внутреннего состояния человека), поэтому даже напряжение 10—20 В может оказаться опасным для здоровья и жизни человека. Следовательно, всегда необходимо учитывать не только напряжение, но и силу электрического тока. При работе в физической лаборатории нужно строго соблюдать правила техники безопасности!

Закон Ома — основа расчётов электрических цепей в электротехнике.

Электрический ток. Закон Ома. Сопротивление проводника Найти

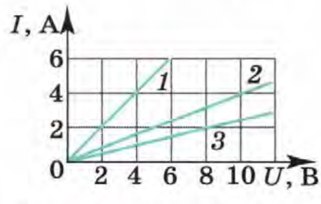
1. Согласно закону Ома сопротивление участка цепи $R = \frac{U}{I}$. Означает ли это, что сопротивление зависит от силы тока или напряжения?
2. Что такое удельное сопротивление проводника?

А1. При увеличении напряжения U на участке электрической цепи сила тока I в цепи изменяется в соответствии с графиком (см. рис.). Электрическое сопротивление на этом участке цепи равно



1) 2 Ом
2) 0,5 Ом
3) 2 мОм
4) 500 Ом

А2. На рисунке изображены графики зависимости силы тока в трёх проводниках от напряжения на их концах. Сопротивление какого проводника равно 2,5 Ом?



1) *1*
2) *2*
3) *3*
4) такого проводника нет

А3. Медная проволока имеет электрическое сопротивление 1,2 Ом. Какое электрическое сопротивление имеет медная проволока, у которой в 4 раза больше длина и в 6 раз больше площадь поперечного сечения?

1) 7,2 Ом 2) 1,8 Ом 3) 0,8 Ом 4) 0,2 Ом

А4. Если увеличить в 2 раза напряжение между концами проводника, а его длину уменьшить в 2 раза, то сила тока, проходящего через проводник,

1) не изменится
2) уменьшится в 4 раза
3) увеличится в 4 раза
4) увеличится в 2 раза

§ 102 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
Как выглядит зависимость силы тока в проводнике от напряжения на нём? от его сопротивления?

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприёмнику и др. Для этого составляют *электрические цепи* различной сложности.

К наиболее простым и часто встречающимся соединениям проводников относятся последовательное и параллельное соединения.

Последовательное соединение проводников. При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочерёдно друг за другом. На рисунке 15.5, *а* показано последовательное соединение двух проводников *1* и *2*, имеющих сопротивления R_1 и R_2. Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и др.

Важно Сила тока в обоих проводниках одинакова, т. е.

$$I_1 = I_2 = I. \qquad (15.5)$$

В проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается, и через любое поперечное сечение проводника за определённое время проходит один и тот же заряд.

Напряжение на концах рассматриваемого участка цепи складывается из напряжений на первом и втором проводниках:

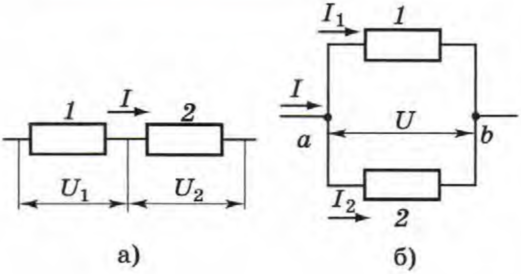
$$U = U_1 + U_2.$$

Определите отношение напряжения на всём проводнике длиной l к напряжению на участке этого проводника длиной $l/4$.

Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков с сопротивлениями проводников R_1 и R_2, можно доказать, что полное сопротивление всего участка цепи при последовательном соединении равно:

$$R = R_1 + R_2. \qquad (15.6)$$

Это правило можно применить для любого числа последовательно соединённых проводников.



Напряжения на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \qquad (15.7)$$

Выведите формулу (15.6) самостоятельно.

Параллельное соединение проводников. На рисунке 15.5, *б* показано параллельное соединение двух проводников *1* и *2* сопротивлениями R_1 и R_2. В этом случае электрический ток I разветвляется на две части. Силу тока в первом и втором проводниках обозначим через I_1 и I_2.

Докажите справедливость соотношения (15.7) самостоятельно.

Так как в точке a — разветвлении проводников (такую точку называют узлом) — электрический заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за это же время. Следовательно,

$$I = I_1 + I_2. \tag{15.8}$$

Важно Напряжение U на концах проводников, соединённых параллельно, одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи.

В осветительной сети обычно поддерживается напряжение 220 В. На это напряжение рассчитаны приборы, потребляющие электрическую энергию. Поэтому параллельное соединение — самый распространённый способ соединения различных потребителей. В этом случае выход из строя одного прибора не отражается на работе остальных, тогда как при последовательном соединении выход из строя одного прибора размыкает цепь. Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков проводников сопротивлениями R_1 и R_2, можно доказать, что величина, обратная полному сопротивлению участка ab, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников:

Выведите формулу (15.9) самостоятельно.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \tag{15.9}$$

Отсюда следует, что для двух проводников

$$R = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}. \tag{15.10}$$

Напряжения на параллельно соединённых проводниках равны: $I_1R_1 = I_2R_2$. Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \tag{15.11}$$

Важно Обратим внимание на то, что если в какой-то из участков цепи, по которой идёт постоянный ток, параллельно к одному из резисторов подключить конденсатор, то ток через конденсатор не будет идти, цепь на участке с конденсатором будет разомкнута. Однако между обкладками конденсатора будет напряжение, равное напряжению на резисторе, и на обкладках накопится заряд $q = CU$.

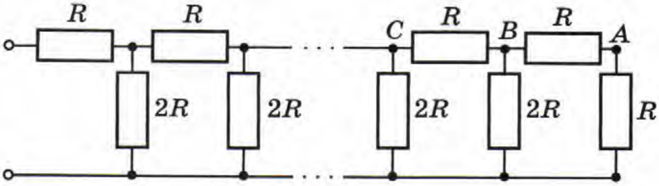


Рис. 15.6

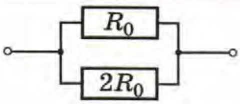
Рассмотрим цепочку сопротивлений R — $2R$, называемую матрицей (рис. 15.6).

На последнем (правом) звене матрицы напряжение делится пополам из-за равенства сопротивлений, на предыдущем звене напряжение тоже делится пополам, поскольку оно распределяется между резистором сопротивлением R и двумя параллельными резисторами сопротивлениями $2R$ и т. д. Эта идея — деления напряжения — лежит в основе преобразования двоичного кода в постоянное напряжение, что необходимо для работы компьютеров.

Параллельное и последовательное соединения резисторов — Найти

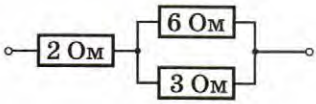
1. Почему лампы в квартире соединяют параллельно, а лампочки в ёлочных гирляндах — последовательно?

2. Сопротивление каждого проводника равно 1 Ом. Чему равно сопротивление двух таких проводников, соединённых: 1) последовательно; 2) параллельно?



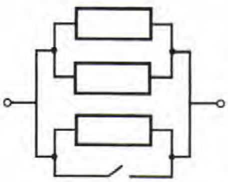
А1. Сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, равно

1) $2R_0/3$ 2) $3R_0$ 3) $1{,}5R_0$ 4) $R_0/3$



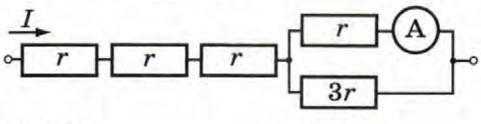
А2. Сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, равно

1) 11 Ом 2) 6 Ом 3) 4 Ом 4) 1 Ом



А3. Каким будет сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке, при замыкании ключа? Каждый из резисторов имеет сопротивление R.

1) R 2) $R/2$ 3) $R/3$ 4) 0



А4. Через участок цепи (см. рис.) идёт постоянный ток. Сила тока I = 8 А. Какую силу тока показывает амперметр? Сопротивление амперметра не учитывайте.

1) 2 А 2) 3 А 3) 6 А 4) 12 А

§ 103 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ОМА. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ»

При решении задач на применение закона Ома необходимо учитывать, что при последовательном соединении проводников сила тока во всех проводниках одинакова, а при параллельном их соединении напряжение одинаково на всех проводниках.

Формулы (15.6), (15.7), (15.9) и (15.11) следуют из закона Ома. Их надо применять при решении задач.

Задача 1. Параллельно амперметру, имеющему сопротивление $R_а = 0{,}5$ Ом, подсоединён медный провод длиной $l = 0{,}4$ м и диаметром $d = 0{,}001$ м. Удельное сопротивление меди $\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Определите полную силу тока в цепи, если амперметр показывает силу тока $I_а = 0{,}2$ А.

Р е ш е н и е. Так как амперметр и провод подключены параллельно, то напряжение на амперметре равно напряжению на проводе:

$$I_а R_а = I_п R_п.$$

Определим сопротивление провода: $R_п = \rho \dfrac{l}{S} = \rho \dfrac{l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \dfrac{4\rho l}{\pi d^2}$.

Тогда $I_п = \dfrac{I_а R_а}{R_п} = \dfrac{I_а R_а}{4\rho l}\pi d^2$. Полная сила тока в цепи

$$I = I_а + I_п = I_а + I_а \frac{R_а \pi d^2}{4\rho l} \approx 12 \text{ А}.$$

Задача 2. На рисунке 15.7 все сопротивления резисторов равны R. Определите эквивалентное сопротивление цепи. Чему равна полная сила тока в цепи, если на клеммы *1*, *2* подано напряжение U?

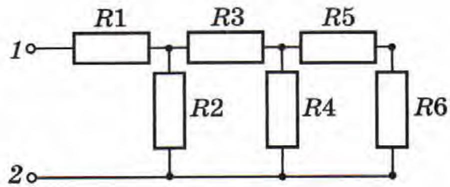


Рис. 15.7

Р е ш е н и е. Трудно определить, как соединены резисторы $R1$ и $R3$ — последовательно или параллельно. В подобных схемах всегда нужно искать резисторы, соединения которых очевидны. Так, очевидно, что резисторы $R5$ и $R6$ соединены последовательно. Значит, $R_{5,6} = R_5 + R_6 = 2R$. Эквивалентный резистор сопротивлением $R_{5,6}$ соединён с резистором R_4 параллельно. Следовательно,

$$\frac{1}{R_{4-6}} = \frac{1}{R_{5,6}} + \frac{1}{R_4}; \quad R_{4-6} = \frac{2RR}{2R + R} = \frac{2}{3}R.$$

Эквивалентный резистор сопротивлением R_{4-6}, в свою очередь, соединён последовательно с резистором R_3:

$$R_{3-6} = R_3 + R_{4-6} = R + (2/3)R = (5/3)R,$$

а эквивалентный резистор сопротивлением R_{3-6} — параллельно с резистором $R2$:

$$R_{2-6} = \frac{R_{3-6}R_2}{R_{3-6}+R_2} = \frac{(5/3)RR}{(5/3)R+R} = \frac{5}{8}R.$$

И наконец, эквивалентный резистор R_{2-6} соединён последовательно с резистором $R1$, так что

$$R_{экв} = R_{2-6} + R = (5/8)R + R = (13/8)R.$$

Из закона Ома следует, что сила тока $I = \frac{U}{R_{экв}} = \frac{8U}{13R}$.

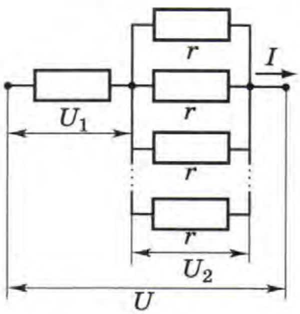


Рис. 15.8

Задача 3. К участку цепи с напряжением U через резистор сопротивлением R подключены параллельно десять лампочек, имеющих одинаковое сопротивление r. Определите напряжение на каждой лампочке.

Решение. Начертим схему цепи (рис. 15.8). Очевидно, что напряжение на каждой лампочке будет одинаково, так как они соединены параллельно. Резистор сопротивлением R и участок цепи с лампочками соединены последовательно, следовательно, $U = U_1 + U_2 = IR + IR_{экв}$. Запишем закон Ома для каждого из участков цепи: $I = \frac{U_1}{R}$; $I = \frac{U_2}{R_{экв}}$, откуда $\frac{U_1}{R} = \frac{U_2}{R_{экв}}$, или $\frac{U-U_2}{R} = \frac{U_2}{R_{экв}}$. Решив это уравнение относительно U_2, получим $U_2 = \frac{UR_{экв}}{R+R_{экв}}$. Найдём эквивалентное сопротивление участка цепи с лампочками из соотношения

$$\frac{1}{R_{экв}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_{10}} = \frac{10}{r}, \text{ откуда } R_{экв} = \frac{r}{10}.$$

Окончательно получим $U_2 = \frac{Ur}{10\left(R+\frac{r}{10}\right)}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. К концам медного проводника длиной 300 м приложено напряжение 36 В. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в проводнике, если концентрация электронов проводимости в меди $8{,}5 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$, а удельное сопротивление $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

2. Сопротивление каждого из проводников, соединённых в квадрат, и проводников, образующих диагонали квадрата, равно r. Определите эквивалентное сопротивление при подключении источника тока: 1) к соседним вершинам; 2) к вершинам, лежащим на одной диагонали. В точке пересечения диагоналей контакта нет.

§ 104 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вспомните, как определяется работа кулоновских сил при перемещении заряда q из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2.

Важно При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу.

Её принято называть *работой тока.*

Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и др. Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд Δq. Электрическое поле совершит при этом работу $A = \Delta q U$ (U — напряжение между концами участка проводника).

Так как сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то работа тока равна:

$$\boxed{A = IU\Delta t.} \qquad (15.12)$$

Важно Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шёл ток.

Согласно закону сохранения энергии эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому

Важно энергия, выделяемая на данном участке цепи за время Δt, равна работе тока.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника, т. е. увеличивается внутренняя энергия проводника. Нагретый проводник отдаёт тепло окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. В результате столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам свою энергию. Энергия беспорядочного движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Так как температура — мера кинетической энергии тела, то температура проводника повышается, и он начинает передавать тепло окружающим телам. Спустя некоторое время после замыкания цепи процесс устанавливается, и температура проводника перестаёт изменяться со временем. За счёт работы электрического поля в проводнике непрерывно выделяется энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Таким образом, формула (15.12) для работы тока определяет количество теплоты, передаваемой проводником другим телам.

Объясните, почему в отсутствие тока при столкновениях свободных электронов с ионами решётки энергия последних не увеличивается.

Если в формуле (15.12) выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы

$$A = IU\Delta t = I^2R\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t = Q. \qquad (15.13)$$

Формулой $A = I^2R\Delta t$ удобно пользоваться при последовательном соединении проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна формула $A = \frac{U^2}{R}\Delta t$, так как напряжение на всех проводниках одинаково.

Закон Джоуля—Ленца. Закон, определяющий количество теплоты, которую выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским учёным Д. Джоулем (1818—1889) и русским учёным Э. Х. Ленцем (1804— 1865).

Закон Джоуля–Ленца Количество теплоты, выделяемой в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = I^2R\Delta t. \qquad (15.14)$$

Как можно экспериментально проверить закон Джоуля—Ленца? Предложите схему опыта.

Мы получили этот закон с помощью рассуждений, основанных на законе сохранения энергии. Формула (15.14) позволяет вычислить количество теплоты, выделяемой на любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.

Мощность тока. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие *мощность тока*.

Важно Мощность тока равна отношению работы тока ко времени прохождения тока. Согласно этому определению мощность тока

$$P = \frac{A}{\Delta t}. \qquad (15.15)$$

Электрическая мощность, так же как и механическая, выражается в *ваттах* (Вт).

Это выражение для мощности тока можно переписать в нескольких эквивалентных формах, используя закон Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

Найдите на любом электроприборе значение его мощности. Обсудите, какой мощности соответствует это значение — полезной или затраченной.

На большинстве электроприборов указана потребляемая ими мощность, предельное значение силы тока, а также предельное значение напряжения.

В быту для расчётов потребляемой электроэнергии часто используется единица кВт · ч, 1 кВт · ч = $3{,}6 \cdot 10^6$ Дж.

Закон Джоуля—Ленца. Работа электрического тока

Найти

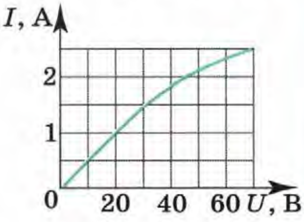
1. Что называют работой тока?
2. Чем отличается понятие работы тока в электростатике от понятия работы в механике?
3. Что такое мощность тока?
4. В каких единицах выражается мощность тока?
5. Можно ли увеличить мощность электроприбора, подавая на него большее напряжение?
6. Какие преобразования энергии происходят в проводнике, когда по нему идёт ток?

A1. Чему равна работа электрического тока за 10 мин, если напряжение на концах проводника равно 10 В, а сила тока равна 1,5 А?
1) 150 Дж 2) 900 Дж 3) 1500 Дж 4) 9000 Дж

A2. При прохождении по проводнику электрического тока в течение 2 мин совершается работа 96 кДж. Сила тока 4 А. Чему равно сопротивление проводника?
1) 0,02 Ом 2) 50 Ом 3) 3 кОм 4) 15 кОм

A3. На цоколе лампы накаливания написано: 150 Вт, 220 В. Определите силу тока в спирали при включении лампы в сеть с номинальным напряжением
1) 0,45 А 2) 0,68 А 3) 22 А 4) 220 000 А

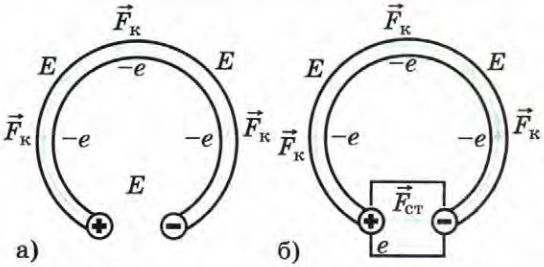
A4. На рисунке показан график зависимости силы тока в лампе накаливания от напряжения на её клеммах. При напряжении 30 В мощность тока в лампе равна
1) 135 Вт 2) 67,5 Вт 3) 45 Вт 4) 20 Вт



A5. Как изменится мощность, потребляемая электрической лампой, если, не изменяя её электрическое сопротивление, уменьшить напряжение на ней в 3 раза?
1) уменьшится в 3 раза
2) уменьшится в 9 раз
3) не изменится
4) увеличится в 9 раз

§ 105 ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой, или сокращённо ЭДС. Так, на круглой батарейке для карманного фонарика написано: 1,5 В. Что это значит?



Если соединить проводником два разноимённо заряженных шарика, то заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет (рис. 15.9, *а*).

Сторонние силы. Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. Для этого необходимо устройство (*источник тока*), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектростатического происхождения (рис. 15.9, *б*). Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (*кулоновское поле*) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

Возьмите два электрометра и зарядите один из них. Затем соедините стержни электрометров проводником и понаблюдайте, как быстро происходит перетекание зарядов.

Запомни Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют **сторонними силами.**

Вывод о необходимости сторонних сил для поддержания постоянного тока в цепи станет ещё очевиднее, если обратиться к закону сохранения энергии.

Важно Электростатическое поле потенциально. Работа этого поля при перемещении в нём заряженных частиц по замкнутой электрической цепи равна нулю. Прохождение же тока по проводникам сопровождается выделением энергии — проводник нагревается. Следовательно, в цепи должен быть какой-то источник энергии, поставляющий её в цепь. В нём, помимо кулоновских сил, обязательно должны действовать сторонние, непотенциальные силы. Работа этих сил вдоль замкнутого контура должна быть отлична от нуля.

Именно в процессе совершения работы этими силами заряженные частицы приобретают внутри источника тока энергию и отдают её затем проводникам электрической цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т. д.

При замыкании цепи создаётся электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием *сторонних сил против кулоновских сил* (электроны от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во внешней цепи их приводит в движение электрическое поле (см. рис. 15.9, *б*).

Природа сторонних сил. Природа сторонних сил может быть разнообразной. В генераторах электростанций сторонние силы — это силы, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике.

В гальваническом элементе, например в элементе Вольта, действуют химические силы.

Интересно

Элемент Вольта состоит из цинкового и медного электродов, помещённых в раствор серной кислоты. Химические силы вызывают растворение цинка в кислоте. В раствор переходят положительно заряженные ионы цинка, а сам цинковый электрод при этом заряжается отрицательно. (Медь очень мало растворяется в серной кислоте.) Между цинковым и медным электродами появляется разность потенциалов, которая и обусловливает ток во внешней электрической цепи.

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой *электродвижущей силой* (сокращённо ЭДС).

Запомни **Электродвижущая сила** источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к абсолютной величине этого заряда:

$$\mathscr{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \qquad (15.16)$$

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой цепи равна электродвижущей силе. ЭДС одного элемента батареи обычно 1—2 В.

Можно говорить также об электродвижущей силе и на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всём контуре, а только на данном участке.

Важно Электродвижущая сила гальванического элемента есть величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому.

Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории перемещения зарядов.

Электродвижущая сила источника тока. Сторонние силы Найти

1. Почему электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный электрический ток в цепи?
2. Какие силы принято называть сторонними?
3. Что называют электродвижущей силой?

§ 106 ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
Из каких элементов состоит электрическая цепь?
Для чего служит источник тока?

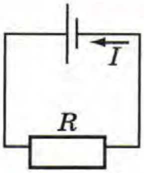


Рис. 15.10

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением R (рис. 15.10). Источник тока имеет ЭДС $\mathscr{E}$ и сопротивление r.

В генераторе r — это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе сопротивление раствора электролита и электродов.

Запомни Сопротивление источника называют **внутренним сопротивлением** в отличие от внешнего сопротивления R цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и *полное сопротивление цепи* $R + r$. Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля—Ленца (15.14).

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд Δq. Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда Δq можно записать так: $A_{\text{ст}} = \mathscr{E}\Delta q$. Согласно определению силы тока (15.1) $\Delta q = I\Delta t$. Поэтому

$$A_{\text{ст}} = \mathscr{E}I\Delta t. \qquad (15.17)$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых r и R, выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля—Ленца оно равно:

$$Q = I^2R\Delta t + I^2r\Delta t. \qquad (15.18)$$

По закону сохранения энергии $A_{\text{ст}} = Q$, откуда получаем

$$\mathscr{E} = IR + Ir. \qquad (15.19)$$

Запомни Произведение силы тока и сопротивления участка цепи называют **падением напряжения на этом участке**.

Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}. \qquad (15.20)$$

Согласно этому закону сила тока в цепи зависит от трёх величин: ЭДС $\mathscr{E}$, сопротивлений R внешнего и r внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ($R \gg r$). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС: $U = IR = \mathscr{E} - Ir \approx \mathscr{E}$.

При коротком замыкании, когда $R \approx 0$, сила тока в цепи $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathscr{E}}{r}$ и определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если r мало (например, у аккумулятора $r \approx 0{,}1$ — $0{,}001$ Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.

Разработайте совместно с одноклассниками схему проводки, позволяющей включать и выключать свет с помощью двух выключателей, находящихся в разных концах комнаты.

Важно Если цепь содержит несколько последовательно соединённых элементов с ЭДС $\mathscr{E}_1$, $\mathscr{E}_2$, $\mathscr{E}_3$ и т. д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов.

Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке 15.11 положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.

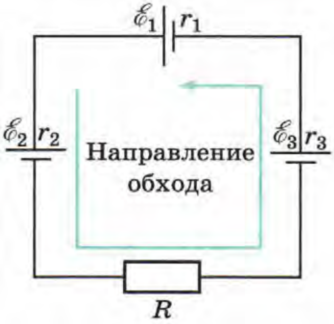


Рис. 15.11

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС считается положительной: $\mathscr{E} > 0$. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу.

Если же при обходе цепи данный источник вызывает ток против направления обхода цепи, то его ЭДС будет отрицательной: $\mathscr{E} < 0$. Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображённой на рисунке 15.11, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$\mathscr{E}_{\text{п}} = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + \mathscr{E}_3 = |\mathscr{E}_1| - |\mathscr{E}_2| + |\mathscr{E}_3|.$$

Если $\mathscr{E}_{\text{п}} > 0$, то согласно формуле (15.20) сила тока $I > 0$, т. е. направление тока совпадает с выбранным направлением обхода контура. При $\mathscr{E}_{\text{п}} < 0$, наоборот, направление тока противоположно выбранному направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи $R_{\text{п}}$ равно сумме всех сопротивлений (см. рис. 15.11):

$$R_{\text{п}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Для любого замкнутого участка цепи, содержащего несколько источников токов, справедливо следующее правило: алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС на этом участке (второе правило Кирхгофа):

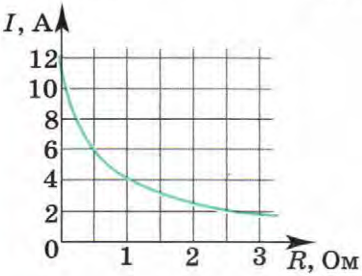
$$I_1R_1 + I_2R_2 + \ldots + I_nR_n = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + \ldots + \mathscr{E}_m.$$

Закон Ома для полной цепи. Характеристики источника тока

1. От чего зависит знак ЭДС в законе Ома для замкнутой цепи?
2. Чему равно внешнее сопротивление в случае: а) короткого замыкания; б) разомкнутой цепи?
3. Из каких элементов состоит полная электрическая цепь?
4. Почему сопротивление амперметра должно быть малым, а сопротивление вольтметра — большим?

A1. Рассчитайте силу тока в замкнутой цепи, состоящей из источника тока, ЭДС которого равна 10 В, а внутреннее сопротивление равно 1 Ом. Сопротивление резистора равно 4 Ом.

1) 2 А 2) 2,5 А 3) 10 А 4) 50 А



A2. К источнику тока с внутренним сопротивлением 0,5 Ом подключили реостат. На рисунке показан график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления. Чему равна ЭДС источника тока?

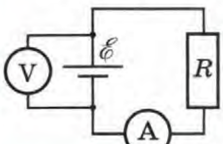
1) 12 В 2) 6 В 3) 4 В 4) 2 В

A3. При подключении к источнику тока резистора с электрическим сопротивлением 2 Ом сила тока в электрической цепи была равна 2 А. При подключении к источнику тока резистора с электрическим сопротивлением 1 Ом сила в электрической цепи была равна 3 А. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?

1) 0,5 Ом 2) 1 Ом 3) 1,5 Ом 4) 2 Ом

A4. При внешнем сопротивлении цепи, равном внутреннему сопротивлению источника, сила тока равна I. Как изменится сила тока, если внешнее сопротивление цепи увеличить в 2 раза?

1) не изменится
2) увеличится в 2 раза
3) уменьшится в 1,5 раза
4) уменьшится в 2 раза



A5. Вольтметр и амперметр, включённые в электрическую цепь (см. рис.), показывают соответственно 9 В и 3 А. Сопротивление нагрузки в 5 раз больше внутреннего сопротивления источника тока. Чему равно сопротивление внешней цепи? Вольтметр и амперметр считайте идеальными.

1) 1,5 Ом 2) 2,5 Ом 3) 6 Ом 4) 12 Ом

§ 107 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ»

При решении задач, связанных с расчётом работы и мощности тока, надо применять формулы (15.13) и (15.15).

Для определения силы тока в замкнутой цепи надо использовать закон Ома для полной цепи, а в случае нескольких источников правильно определить суммарную ЭДС.

Задача 1. Аккумулятор с ЭДС $\mathscr{E} = 6{,}0$ В и внутренним сопротивлением $r = 0{,}1$ Ом питает внешнюю цепь с сопротивлением $R = 12{,}4$ Ом. Какое количество теплоты Q выделится во всей цепи за время $t = 10$ мин?

Решение. Согласно закону Ома для замкнутой цепи сила тока в цепи равна $I = \frac{\mathscr{E}}{R+r}$. Количество теплоты, выделившейся на внешнем участке цепи, $Q_1 = I^2Rt$, на внутреннем — $Q_2 = I^2rt$. Полное количество теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2(R + r)t = \frac{\mathscr{E}^2 t}{R+r} = 1728 \text{ Дж}.$$

Задача 2. Разность потенциалов в сети зарядной станции равна 20 В. Внутреннее сопротивление аккумулятора, поставленного на зарядку, равно 0,8 Ом; в начальный момент времени его остаточная ЭДС равна 12 В. Какая мощность будет расходоваться станцией на зарядку аккумулятора при этих условиях? Какая часть этой мощности будет расходоваться на нагревание аккумулятора?

Решение. При зарядке аккумулятора зарядное устройство и аккумулятор соединены разноимёнными полюсами навстречу друг другу. Сила тока, идущего через аккумулятор, $I = (U - \mathscr{E})/R$. Мощность, расходуемая станцией:

$$P_1 = UI = U(U - \mathscr{E})/R = 200 \text{ Вт}.$$

Мощность, расходуемая на нагревание аккумулятора:

$$P_2 = I^2R = \left(\frac{U-\mathscr{E}}{R}\right)^2 R = 80 \text{ Вт}.$$

Тогда $P_2/P_1 = 0{,}4$.

Задача 3. При подключении вольтметра сопротивлением $R_V = 200$ Ом непосредственно к зажимам источника он показывает $U = 20$ В. Если же этот источник замкнуть на резистор сопротивлением $R = 8$ Ом, то сила тока в цепи $I_2 = 0{,}5$ А. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

Решение. По закону Ома для полной цепи в первом случае сила тока $I_1 = \frac{\mathscr{E}}{R_V + r}$, во втором случае $I_2 = \frac{\mathscr{E}}{R+r}$. Показания вольтметра — падение напряжения на его внутреннем сопротивлении, т. е. $U = I_1R_V$. Из соотношения $I_1(R_V + r) = I_2(R + r)$ найдём внутреннее сопротивление источника:

$$r = \frac{I_1R_V - I_2R}{I_2 - I_1} = \frac{U - I_2R}{I_2 - \frac{U}{R_V}} = \frac{(U - I_2R)R_V}{I_2R_V - U} = 40\ \text{Ом}.$$

Для ЭДС источника запишем: $\mathscr{E} = I_2(R + r) = 24$ В.

Задача 4. Определите силу тока короткого замыкания для источника, который при силе тока в цепи $I_1 = 10$ А имеет полезную мощность $P_1 = 500$ Вт, а при силе тока $I_2 = 5$ А — мощность $P_2 = 375$ Вт.

Решение. Сила тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathscr{E}}{r}$. Полезная мощность $P = IU$, где U — напряжение на зажимах источника, или падение напряжения на внешнем участке цепи. Напряжения на зажимах источника в первом и во втором случаях

$$U_1 = \frac{P_1}{I_1} = \mathscr{E} - I_1r, \; U_2 = \frac{P_2}{I_2} = \mathscr{E} - I_2r.$$

Вычтем почленно из первого выражения второе:

$$\frac{P_1}{I_1} - \frac{P_2}{I_2} = (\mathscr{E} - I_1r) - (\mathscr{E} - I_2r) = (I_2 - I_1)r,$$

откуда определим $r = \frac{P_1I_2 - P_2I_1}{I_1I_2(I_2 - I_1)} = 5$ Ом.

ЭДС источника тока

$$\mathscr{E} = U_1 + I_1r = \frac{P_1}{I_1} + \frac{I_1(P_1I_2 - P_2I_1)}{I_1I_2(I_2 - I_1)} = \frac{P_1}{I_1} + \frac{P_1I_2 - P_2I_1}{I_2(I_2 - I_1)} = 100\ \text{В}.$$

Окончательно для силы тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathscr{E}}{r} = 20$ А.

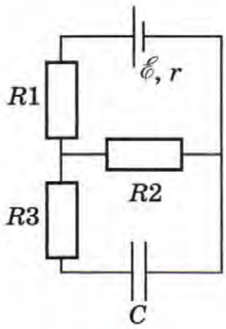


Рис. 15.12

Задача 5. Конденсатор ёмкостью 2 мкФ включён в цепь (рис. 15.12), содержащую три резистора и источник постоянного тока с ЭДС 3,6 В и внутренним сопротивлением 1 Ом. Сопротивления резисторов $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 7$ Ом, $R_3 = 3$ Ом. Чему равен заряд на правой обкладке конденсатора?

Решение. Участок цепи, в котором находится конденсатор, разомкнут, и ток через резистор $R3$ не идёт.

Разность потенциалов между пластинами конденсатора равна падению напряжения на резисторе $R2$: $U = IR_2$.

Сила тока, идущего по цепи, согласно закону Ома равна $I = \frac{\mathscr{E}}{R_2 + R_1 + r}$.

Тогда

$$U = \frac{\mathscr{E}}{R_2 + R_1 + r}R_2.$$

Заряд на обкладках конденсатора $q = CU = C\frac{\mathscr{E}}{R_2 + R_1 + r}R_2 = 4{,}2 \cdot 10^{-6}$ Кл.

На правой обкладке конденсатора накопится отрицательный заряд, так как она подключена к отрицательному полюсу источника.

Задача 6. Определите параметры источника тока, если известно, что максимальная мощность, равная 40 Вт, выделяется при подключении резистора сопротивлением 10 Ом.

Решение. Максимальная мощность выделяется при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений, следовательно, $R = r = 10$ Ом.

Мощность определяется формулой $P = I^2R$, или с учётом закона Ома:

$$P_{\max} = \frac{\mathscr{E}^2}{(R+r)^2}R = \frac{\mathscr{E}^2}{4R}.$$

Тогда ЭДС источника

$$\mathscr{E} = 2\sqrt{RP_{\max}} = 40\text{ В}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. За некоторый промежуток времени электрическая плитка, включённая в сеть с постоянным напряжением, выделила количество теплоты Q. Какое количество теплоты выделят за то же время две такие плитки, включённые в ту же сеть последовательно? параллельно? Изменение сопротивления спирали в зависимости от температуры не учитывать.

2. Чему равно напряжение на клеммах гальванического элемента с ЭДС, равной $\mathscr{E}$, если цепь разомкнута?

3. Чему равна сила тока при коротком замыкании аккумулятора с ЭДС $\mathscr{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0{,}01$ Ом?

4. Батарейка для карманного фонаря замкнута на резистор переменного сопротивления. При сопротивлении резистора, равном 1,65 Ом, напряжение на нём равно 3,30 В, а при сопротивлении, равном 3,50 Ом, напряжение равно 3,50 В. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление батарейки.

5. Источники тока с ЭДС 4,50 В и 1,50 В и внутренними сопротивлениями 1,50 Ом и 0,50 Ом, соединённые, как показано на рисунке 15.13, питают лампу от карманного фонаря. Какую мощность потребляет лампа, если известно, что сопротивление её нити в нагретом состоянии равно 23 Ом?

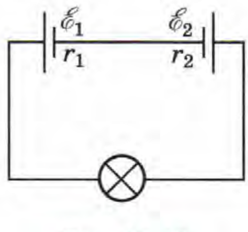


Рис. 15.13

6. Замкнутая цепь питается от источника с ЭДС $\mathscr{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом. Постройте графики зависимости силы тока в цепи, напряжения на зажимах источника и мощности от сопротивления внешнего участка.

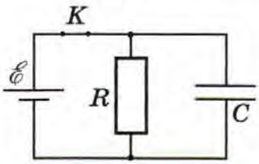
7. Два элемента, имеющие одинаковые ЭДС по 4,1 В и одинаковые внутренние сопротивления по 4 Ом, соединены одноимёнными полюсами, от которых сделаны выводы, так что получилась батарейка. Какую ЭДС и какое внутреннее сопротивление должен иметь элемент, которым можно было бы заменить такую батарейку?

C1. Резисторы поочерёдно подключают к источнику постоянного тока. Сопротивления резисторов равны соответственно 3 Ом и 12 Ом. Мощность тока в резисторах одинакова. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?

C2. ЭДС источника постоянного тока $\mathscr{E} = 2$ В, а его внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом. Мощность тока в резисторе, подключённом к источнику, $P_0 = 0,75$ Вт. Чему равна сила тока в цепи?

C3. Электрическая цепь состоит из источника тока и реостата. ЭДС источника 6 В, его внутреннее сопротивление $r = 2$ Ом. Сопротивление реостата можно изменять в пределах от 1 до 5 Ом. Чему равна максимальная мощность, выделяемая на реостате?

C4. К однородному медному цилиндрическому проводнику длиной 10 м приложили разность потенциалов 1 В. Определите промежуток времени, в течение которого температура проводника повысится на 10 К. Изменением сопротивления проводника и рассеянием тепла при его нагревании можно пренебречь. Плотность меди 8900 кг/м^3, удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, удельная теплоёмкость меди 380 Дж/(кг · К).



В электрической схеме, показанной на рисунке, ключ K замкнут. Заряд конденсатора $q = 2$ мкКл, ЭДС батарейки $\mathscr{E} = 24$ В, её внутреннее сопротивление $r = 5$ Ом, сопротивление резистора $R = 25$ Ом. Определите количество теплоты, которая выделяется на резисторе после размыкания ключа K в результате разрядки конденсатора. Потерями на излучение можно пренебречь.

Повторите материал главы 15 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Источники постоянного тока и их применение»

1. Первые источники тока — химические источники.
2. Фотоэлектрический эффект. Фотоэлементы.
3. Термоэлектрический эффект. Термоэлементы.
4. Применение источников постоянного тока в современной технике.

«Экспериментальная проверка закона Ома для полной цепи»

«Создание экспериментальной установки для исследования тепловых действий тока»

«Обоснование общего закона сохранения энергии на основе исследований тепловых действий тока»

ГЛАВА 16 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В этой главе вы познакомитесь с физическими процессами, обусловливающими прохождение тока в различных средах.

§ 108 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ. ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Как движутся электроны в металлическом проводнике, когда в нём нет электрического поля?
Как изменяется движение электронов, когда к металлическому проводнику прикладывают напряжение?

Электрический ток проводят твёрдые, жидкие и газообразные тела. Чем эти проводники отличаются друг от друга?

Мы познакомились с электрическим током в металлических проводниках и с установленной экспериментально вольт-амперной характеристикой этих проводников — законом Ома.

Наряду с металлами хорошими проводниками, т. е. веществами с большим количеством свободных заряженных частиц, являются водные растворы или расплавы электролитов и ионизованный газ — плазма. Эти проводники широко используются в технике.

В вакуумных электронных приборах электрический ток образуют потоки электронов.

Интересно

Металлические проводники находят самое широкое применение в передаче электроэнергии от источников тока к потребителям. Кроме того, эти проводники используются в электродвигателях и генераторах, электронагревательных приборах и т. д.

Кроме *проводников* и *диэлектриков* (веществ со сравнительно небольшим количеством свободных заряженных частиц), имеется группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества не настолько хорошо проводят электричество, чтобы их назвать проводниками, но и не настолько плохо, чтобы их отнести к диэлектрикам. Поэтому они получили название *полупроводников*.

Долгое время полупроводники не играли заметной практической роли. В электротехнике и радиотехнике применяли исключительно различные проводники и диэлектрики. Положение существенно изменилось, когда сначала была предсказана теоретически, а затем обнаружена и изучена легкоосуществимая возможность управления электрической проводимостью полупроводников.

Ещё раз подчеркнём, что нет универсального носителя тока. В таблице приведены носители тока в различных средах.

Среда	Носители тока
Металл	Свободные электроны

Продолжение

Среда	Носители тока
Электролит	Положительные и отрицательные ионы
Газ	Ионы и электроны
Вакуум	Электроны
Полупроводник	Свободные электроны и дырки

Электронная проводимость металлов. Начнём с металлических проводников. Вольт-амперная характеристика этих проводников нам известна, но пока ничего не говорилось о её объяснении с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Важно Носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. Их концентрация велика — порядка 10^{28} 1/м^3.

Л. И. Мандельштам
(1879—1944)

Эти электроны участвуют в беспорядочном тепловом движении. Под действием электрического поля они начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью порядка 10^{-4} м/с.

Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах. Экспериментальное доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах Мандельштама и Папалекси (1913), Стюарта и Толмена (1916). Схема этих опытов такова.

На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 16.1). К концам дисков при помощи скользящих контактов подключают гальванометр.

Рис. 16.1

Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки катушки свободные заряженные частицы некоторое время движутся относительно проводника по инерции, и, следовательно, в катушке возникает электрический ток. Ток существует незначительное время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц, образующее ток, прекращается.

Направление тока в этом опыте говорит о том, что он создаётся движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе, т. е. $|q|/m$. Поэтому, измеряя заряд, проходящий через гальванометр за время существования тока в цепи, удалось определить это отношение. Оно оказалось равным $1{,}8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Эта величина совпадала с отношением заряда электрона к его массе e/m, найденным ранее из других опытов.

Движение электронов в металле. Свободные электроны в металле движутся хаотично. При подключении проводника к источнику тока в нём создаётся электрическое поле, и на электроны начинает действовать кулоновская сила $\vec{F} = q_e \vec{E}$. Под действием этой силы электроны начинают двигаться направленно, т. е. на хаотичное движение электронов накладывается направленное движение с ускорением $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_e}$. Скорость направленного движения увеличивается в течение некоторого времени t_0 до тех пор, пока не произойдёт столкновение электронов с ионами кристаллической решётки. При этом электроны теряют направление движения, а затем опять начинают двигаться направленно. Таким образом, скорость направленного движения электрона изменяется от нуля до некоторого максимального значения, равного $\frac{q_e E t_0}{m_e}$. В результате средняя скорость упорядоченного движения электронов оказывается равной $\frac{q_e E}{m_e}\frac{t_0}{2}$, т. е. пропорциональной напряжённости электрического поля в проводнике: $v \sim E$ и, следовательно, разности потенциалов на концах проводника, так как $E = \frac{U}{l}$, где l — длина проводника.

Выведите выражение для удельного сопротивления металла, используя формулу (15.2) (с. 333) и выражение для средней скорости электронов.

Важно Сила тока в проводнике пропорциональна скорости упорядоченного движения частиц (см. формулу (15.2)). Поэтому можем сказать, что сила тока пропорциональна разности потенциалов на концах проводника: $I \sim U$.

В этом состоит *качественное объяснение закона Ома* на основе электронной теории проводимости металлов.

Интересно

Построить удовлетворительную количественную теорию движения электронов в металле на основе законов классической механики невозможно. Дело в том, что условия движения электронов в металле таковы, что классическая механика Ньютона неприменима для описания этого движения. Этот факт подтверждает, например, зависимость сопротивления от температуры. Согласно классической теории металлов, в которой движение электронов рассматривается на основе второго закона Ньютона, сопротивление проводника пропорционально $\sqrt{T}$, эксперимент же показывает линейную зависимость сопротивления от температуры.

Проводимость металлов. Движение электронов в металле Найти

1. Чем отличаются проводники от полупроводников?
2. Катушка (см. рис. 16.1) вращалась по часовой стрелке, а затем была резко заторможена. Каково направление электрического тока в катушке в момент торможения?
3. Что определяет скорость упорядоченного движения электронов в металле?
4. Какие частицы находятся в узлах кристаллической решётки металла?

§ 109 ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Вспомните, какую физическую величину называют сопротивлением. От чего и как зависит сопротивление металлического проводника?

Различные вещества имеют разные удельные сопротивления (см. § 101). Зависит ли сопротивление от состояния проводника? от его температуры? Ответ должен дать опыт.

Если пропустить ток от аккумулятора через стальную спираль, а затем начать нагревать её в пламени горелки, то амперметр покажет уменьшение силы тока. Это означает, что с изменением температуры сопротивление проводника меняется.

Если при температуре, равной 0 °C, сопротивление проводника равно R_0, а при температуре t оно равно R, то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры t:

$$\boxed{\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t.} \qquad (16.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называют температурным коэффициентом сопротивления.

Запомни **Температурный коэффициент сопротивления** — величина, равная отношению относительного изменения сопротивления проводника к изменению его температуры.

Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры.

Важно Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К (на 1 °С).

Для всех металлических проводников коэффициент $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых металлов $\alpha \approx \frac{1}{273}\,\text{К}^{-1}$.

Важно У растворов электролитов сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается. Для них $\alpha < 0$. Например, для 10%-ного раствора поваренной соли $\alpha = -0{,}02\ \text{К}^{-1}$.

Обсудите с соседом по парте вопрос о различии характеров зависимости сопротивления металлов и растворов электролитов от температуры. Чем это различие определяется?

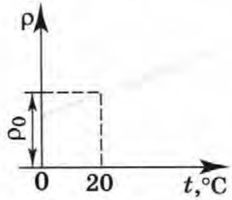
При нагревании проводника его геометрические размеры меняются незначительно. Сопротивление проводника меняется в основном за счёт изменения его удельного сопротивления. Можно найти зависимость этого удельного сопротивления от температуры, если в формулу (16.1) подставить значения $R = \rho\frac{l}{S}$ и $R_0 = \rho_0\frac{l}{S}$. Вычисления приводят к следующему результату:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \text{ или } \rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T), \tag{16.2}$$

где ΔT — изменение абсолютной температуры.

Важно Так как α мало меняется при изменении температуры проводника, то можно считать, что удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры (рис. 16.2).

Увеличение сопротивления можно объяснить тем, что при повышении температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решётки, поэтому свободные электроны сталкиваются с ними чаще, теряя при этом направленность движения. Хотя коэффициент α довольно мал, учёт зависимости сопротивления от температуры при расчёте параметров нагревательных приборов совершенно необходим. Так, сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания увеличивается при прохождении по ней тока за счёт нагревания более чем в 10 раз.



У некоторых сплавов, например у сплава меди с никелем (константан), температурный коэффициент сопротивления очень мал: $\alpha \approx 10^{-5}$ К$^{-1}$; удельное сопротивление константана велико: $\rho \approx 10^{-6}$ Ом · м. Такие сплавы используют для изготовления эталонных резисторов и добавочных резисторов к измерительным приборам, т. е. в тех случаях, когда требуется, чтобы сопротивление заметно не менялось при колебаниях температуры.

Существуют и такие металлы, например никель, олово, платина и др., температурный коэффициент которых существенно больше: $\alpha \approx 10^{-3}$ К$^{-1}$. Зависимость их сопротивления от температуры можно использовать для измерения самой температуры, что и осуществляется в *термометрах сопротивления.*

На зависимости сопротивления от температуры основаны и приборы, изготовленные из полупроводниковых материалов, — *термисторы*. Для них характерны большой температурный коэффициент сопротивления (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), стабильность характеристик во времени. Номинальное сопротивление термисторов значительно выше, чем у металлических термометров сопротивления, оно обычно составляет 1, 2, 5, 10, 15 и 30 кОм.

Интересно

Обычно в качестве основного рабочего элемента термометра сопротивления берут платиновую проволоку, зависимость сопротивления которой от температуры хорошо известна. Об изменениях температуры судят по изменению сопротивления проволоки, которое можно измерить.Такие термометры позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны.

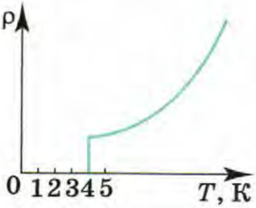


Рис. 16.3

Сверхпроводимость. Сопротивление металлов уменьшается с уменьшением температуры. Что произойдёт при стремлении температуры к абсолютному нулю?

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление — *сверхпроводимость*. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко падает до нуля (рис. 16.3).

Запомни Явление падения до нуля сопротивления проводника при критической температуре называется **сверхпроводимостью**.

Открытие Камерлинг-Оннеса, за которое в 1913 г. ему была присуждена Нобелевская премия, повлекло за собой исследования свойств веществ при низких температурах. Позже было открыто много других сверхпроводников.

Сверхпроводимость многих металлов и сплавов наблюдается при очень низких температурах — начиная примерно с 25 К. В справочных таблицах приводятся температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых веществ.

Запомни Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется **критической температурой**.

Критическая температура зависит не только от химического состава вещества, но и от структуры самого кристалла. Например, серое олово имеет структуру алмаза с кубической кристаллической решёткой и является полупроводником, а белое олово обладает тетрагональной элементарной ячейкой и является серебристо-белым, мягким, пластичным металлом, способным при температуре, равной 3,72 К, переходить в сверхпроводящее состояние.

У веществ в сверхпроводящем состоянии были отмечены резкие аномалии магнитных, тепловых и ряда других свойств, так что правильнее говорить не о сверхпроводящем состоянии, а об особом, наблюдаемом при низких температурах состоянии вещества.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем удалить источник тока, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго. В обычном же (несверхпроводящем) проводнике электрический ток в этом случае прекращается.

Подумайте, что останавливает направленное движение электронов в проводнике.

Сверхпроводники находят широкое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. Ведь *выделения тепла в сверхпроводящей обмотке не происходит.*

Однако получить сколь угодно сильное магнитное поле с помощью сверхпроводящего магнита нельзя. Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Такое поле может быть создано и током в самом сверхпроводнике. Поэтому для каждого проводника в сверхпроводящем состоянии существует критическое значение силы тока, превысить которое, не нарушая сверхпроводящего состояния, нельзя.

Интересно

Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах, преобразующих механическую энергию струи раскалённого ионизованного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.

Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано лишь в 1957 г. американскими учёными Дж. Бардином, Л. Купером, Дж. Шриффером и советским учёным, академиком Н. Н. Боголюбовым.

В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость. Получены сложные оксидные соединения лантана, бария и других элементов (керамики) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100 К. Это выше температуры кипения жидкого азота при атмосферном давлении (77 К).

Высокотемпературная сверхпроводимость в недалёком будущем приведёт наверняка к новой технической революции во всей электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ. Сейчас прогресс в этой области тормозится необходимостью охлаждения проводников до температур кипения дорогого газа — гелия.

Интересно

Физический механизм сверхпроводимости довольно сложен. Очень упрощённо его можно объяснить так: электроны объединяются в правильную шеренгу и движутся, не сталкиваясь с кристаллической решёткой, состоящей из ионов. Это движение существенно отличается от обычного теплового движения, при котором свободный электрон движется хаотично.

Надо надеяться, что удастся создать сверхпроводники и при комнатной температуре. Генераторы и электродвигатели станут исключительно компактными (уменьшатся в несколько раз) и экономичными. Электроэнергию можно будет передавать на любые расстояния без потерь и аккумулировать в простых устройствах.

Сопротивление. Удельное сопротивление. Сверхпроводимость Найти

1. Когда электрическая лампочка потребляет бóльшую мощность: сразу после включения её в сеть или спустя несколько минут?
2. Если бы сопротивление спирали электроплитки не менялось с температурой, то её длина при номинальной мощности должна быть большей или меньшей?
3. Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике?
4. Как убедиться в том, что в кольцевом сверхпроводнике действительно устанавливается неизменный ток?

A1. Сопротивление медного провода, с помощью которого электроприбор подключается к источнику тока, не должно превышать 8 Ом. На каком максимальном расстоянии от источника можно установить электроприбор, если диаметр провода 2 мм? Удельное сопротивление меди $1{,}68 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
1) 1500 м 2) 15 м 3) 150 м 4) 750 м

A2. На сколько градусов нагрелась вольфрамовая спираль лампы, если её сопротивление увеличилось на 46%?
1) 20 °С 2) 50 °С 3) 100 °С 4) 1000 °С

§ 110 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ. СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТИ

Почему сопротивление проводников зависит от температуры?
Какие явления наблюдаются в состоянии сверхпроводимости?

Запомни **Полупроводники** — вещества, удельное сопротивление которых имеет промежуточное значение между удельным сопротивлением металлов (10^{-6}—10^{-8} Ом · м) и удельным сопротивлением диэлектриков (10^{8}—10^{13} Ом · м).

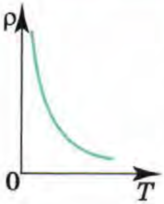


Рис. 16.4

Отличие проводников от полупроводников особенно проявляется при анализе зависимости их электропроводимости от температуры. Исследования показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен, индий, мышьяк и др.) и соединений (PbS, CdS, GaAs и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растёт, как у металлов (см. рис. 16.3), а, наоборот, чрезвычайно резко уменьшается (рис. 16.4). Такое свойство присуще именно *полупроводникам*.

Из графика, изображённого на рисунке, видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. Это означает, что при низких температурах полупроводник ведёт себя как диэлектрик. По мере повышения температуры его удельное сопротивление быстро уменьшается.

Строение полупроводников. Для того чтобы включить транзисторный приёмник, знать ничего не надо. Но чтобы его создать, надо было знать очень много и обладать незаурядным талантом. Понять же в общих чертах, как работает транзистор, не так уж и трудно. Сначала необходимо познакомиться с механизмом проводимости в полупроводниках. А для этого придётся вникнуть в *природу связей*, удерживающих атомы полупроводникового кристалла друг возле друга.

Для примера рассмотрим кристалл кремния.

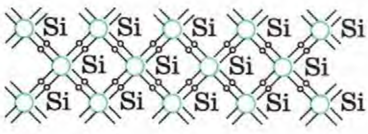


Рис. 16.5

Кремний — четырёхвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке его атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанные с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырём. Схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке 16.5.

Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой *ковалентной связью*. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, электроны отделяются от атома, которому они принадлежат (коллективизируются кристаллом), и при своём движении бóльшую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Не надо думать, что коллективизированная пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и любой валентный электрон может двигаться по одной из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

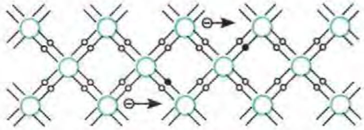


Рис. 16.6

Парноэлектронные связи в кристалле кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомов валентные электроны являются как бы цементирующим раствором, удерживающим кристаллическую решётку, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость. При нагревании кремния кинетическая энергия частиц повышается, и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторённые пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решётки, создавая электрический ток (рис. 16.6).

Запомни Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют **электронной проводимостью.**

При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается. При нагревании от 300 до 700 К число свободных носителей заряда увеличивается от 10^{17} до 10^{24} 1/м^3. Это приводит к уменьшению сопротивления.

Дырочная проводимость.

Запомни При разрыве связи между атомами полупроводника образуется вакантное место с недостающим электроном, которое называют **дыркой.**

В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, не разорванными связями (см. рис. 16.6).

Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.

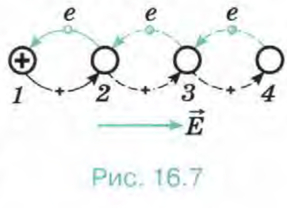


Рис. 16.7

Если напряжённость электрического поля в образце равна нулю, то перемещение дырок происходит беспорядочно и поэтому не создаёт электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок.

Важно Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов (рис. 16.7).

В отсутствие внешнего поля на один свободный электрон (−) приходится одна дырка (+). При наложении поля свободный электрон смещается против напряжённости поля. В этом направлении перемещается также один из связанных электронов. Это выглядит как перемещение дырки в направлении поля.

Итак, в полупроводниках имеются носители заряда двух типов: электроны и дырки.

Запомни Проводимость, обусловленная движением дырок, называется **дырочной проводимостью** полупроводников.

Мы рассмотрели механизм проводимости чистых полупроводников.

Запомни Проводимость чистых полупроводников называют **собственной проводимостью**.

Примесная проводимость. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов: например, в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13}$см$^{-3}$. В то же время число атомов германия в 1 см^3 порядка 10^{23}.

Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятимиллиардную часть от общего числа атомов.

Проводимость полупроводников можно существенно увеличить, внедряя в них примесь. В этом случае наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная — *примесная проводимость*.

Запомни Проводимость проводников, обусловленная внесением в их кристаллические решётки примесей (атомов посторонних химических элементов), называется **примесной проводимостью.**

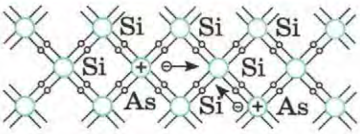


Рис. 16.8

Донорные примеси. Добавим в кремний небольшое количество мышьяка. Атомы мышьяка имеют пять валентных электронов. Четыре из них участвуют в создании ковалентной связи данного атома с окружающими атомами кремния. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом. Он легко покидает атом мышьяка и становится свободным (рис. 16.8).

При добавлении одной десятимиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см$^{-3}$. Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Запомни Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными** (отдающими) **примесями.**

Свободные электроны перемещаются по полупроводнику подобно тому, как перемещаются свободные электроны в металле.

Запомни Полупроводники, имеющие донорные примеси и потому обладающие большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), называются **полупроводниками *n*-типа** (от английского слова negative — отрицательный).

Важно В полупроводнике *n*-типа электроны являются *основными* носителями заряда, а дырки — *неосновными*.

Акцепторные примеси. Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трёхвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется. Для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостаёт одного электрона, который он берёт у соседнего атома кристалла. В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси (рис. 16.9).

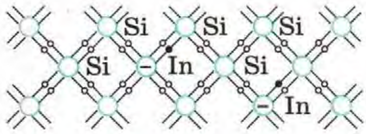


Рис. 16.9

Запомни Примеси в полупроводнике, создающие дополнительную концентрацию дырок, называют **акцепторными** (принимающими) **примесями.**

При наличии электрического поля дырки перемещаются направленно и возникает электрический ток, обусловленный дырочной проводимостью.

Запомни Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют **полупроводниками *p*-типа** (от английского слова positive — положительный).

Важно *Основными* носителями заряда в полупроводнике *p*-типа являются дырки, а *неосновными* — электроны.

Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией одного из носителей тока электронов или дырок. Эта особенность полупроводников открывает широкие возможности для их практического применения.

Обсудите с одноклассником, как влияет собственная проводимость на силу тока в проводнике с одним из типов примесной проводимости.

Проводимость полупроводников. Примесная проводимость Найти

1. Какую связь называют ковалентной?
2. В чём состоит различие зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры?
3. Какие подвижные носители зарядов имеются в чистом полупроводнике?
4. Что происходит при встрече электрона с дыркой?
5. Почему сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей?
6. Какие носители заряда являются основными в полупроводнике с акцепторной примесью?
7. Какую примесь надо ввести в полупроводник, чтобы получить полупроводник *n*-типа?

§ 111 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ЧЕРЕЗ КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С РАЗНЫМ ТИПОМ ПРОВОДИМОСТИ. ТРАНЗИСТОРЫ

Какие носители тока в полупроводнике являются основными, а какие — неосновными?
Чем отличается примесная проводимость от собственной проводимости?

Наиболее интересные явления происходят при контакте полупроводников *n*- и *p*-типов. Эти явления используются в большинстве полупроводниковых приборов.

***p—n*-Переход.** Рассмотрим, что будет происходить, если привести в контакт два одинаковых полупроводника, но с разным типом проводимости: слева полупроводник *n*-типа, а справа полупроводник *p*-типа (рис. 16.10).

Запомни Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости называют ***p—n*- или *n—p*-переходом**.

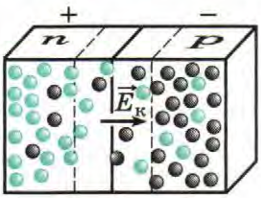


Рис. 16.10

Электроны на рисунке изображены голубыми кружочками, дырки — серыми.

В левой части много свободных электронов, а в правой их концентрация очень мала. В правой части, наоборот, много дырок, т. е. вакантных мест для электронов. Как только полупроводники приводят в контакт, начинается диффузия электронов из области с проводимостью *n*-типа в область с проводимостью *p*-типа и соответственно переход дырок в обратном направлении. Перешедшие в полупроводник *p*-типа электроны занимают свободные места, происходит процесс рекомбинации электронов и дырок, а попавшие в полупроводник *n*-типа дырки также исчезают благодаря электронам, занимающим вакантное место. Таким образом, вблизи границы раздела полупроводников с разным типом проводимости возникает слой, обеднённый носителями тока (его называют *контактным* слоем). Этот слой фактически представляет собой диэлектрик, его сопротивление очень велико. При этом полупроводник *n*-типа заряжается положительно, а полупроводник *p*-типа — отрицательно. В зоне контакта возникает стационарное электрическое поле напряжённостью $\vec{E}_к$, препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок.

Объясните, почему полупроводник из одного и того же материала может иметь разный тип проводимости.

Суммарное сопротивление приведённых в контакт полупроводников складывается из сопротивления полупроводника *n*-типа, *p—n*-перехода и полупроводника *p*-типа: $R = R_n + R_{pn} + R_p$. Так как сопротивления областей с *n*- и *p*-типами проводимости малы (там много носителей заряда — электронов и дырок), то суммарное сопротивление определяется в основном сопротивлением *p—n*-перехода: $R \approx R_{pn}$.

Включим полупроводник с p—n-переходом в электрическую цепь так, чтобы потенциал полупроводника p-типа был положительным, а n-типа — отрицательным (рис. 16.11). В этом случае напряжённость внешнего поля будет направлена в сторону, противоположную напряжённости контактного слоя. Модуль суммарной напряжённости $E = E_к - E_{внеш}$. Так как поле, удерживающее носители тока, ослабевает, то у электронов уже достаточно энергии, чтобы его преодолеть.

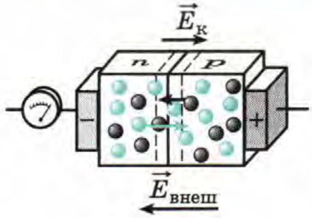


Рис. 16.11

Важно Через переход пойдёт ток, при этом он будет создан основными носителями — из области с n-типом проводимости в область с p-типом проводимости идут электроны, а из области с p-типом в область с n-типом — дырки. В этом случае p—n-переход называется **прямым**.

Отметим, что электрический ток идёт во всей цепи: от положительного контакта через область p-типа к p—n-переходу, затем через область n-типа к отрицательному контакту (рис. 16.12). Проводимость всего образца велика, а сопротивление мало. Чем больше подаваемое на контакт напряжение, тем больше сила тока.

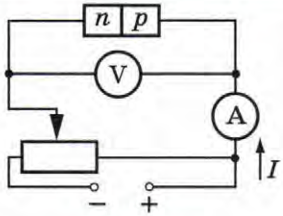


Рис. 16.12

Зависимость силы тока от разности потенциалов — вольт-амперная характеристика прямого перехода — изображена на рисунке 16.13 сплошной линией.

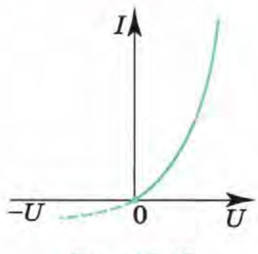


Рис. 16.13

Отметим, что изменение подаваемого напряжения приводит к резкому увеличению силы тока. Так, увеличение напряжения на 0,25 В может привести к увеличению силы тока в 20 000 раз.

При прямом переходе сопротивление запирающего слоя мало, и оно также зависит от подаваемого напряжения, с увеличением которого сопротивление уменьшается.

Изменим теперь полярность подключения батареи. В этом случае напряжённости внешнего и контактного полей направлены в одну сторону (рис. 16.14) и модуль суммарной напряжённости $E = E_к + E_{внеш}$. Внешнее поле оттягивает электроны и дырки от контактного слоя, в результате чего он расширяется. В связи с этим у электронов уже не хватает энергии для того, чтобы преодолеть этот слой. Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало.

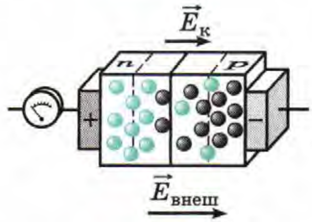


Рис. 16.14

Важно Сопротивление контактного слоя очень велико. Ток через p—n-переход не идёт. Образуется так называемый *запирающий* слой. Такой переход называется **обратным**.

Вольт-амперная характеристика обратного перехода изображена на рисунке 16.13 штриховой линией.

p—n-Переход по отношению к току оказывается несимметричным: в прямом направлении сопротивление перехода значительно меньше, чем в обратном. Таким образом, *p—n*-переход можно использовать для выпрямления электрического тока.

Запомни Устройство, содержащее *p—n*-переход и способное пропускать ток в одном направлении и не пропускать в противоположном, называется **полупроводниковым диодом.**

Если на контакты полупроводникового диода подать переменное напряжение, то ток по цепи пойдёт только в одну сторону.

Полупроводниковые диоды изготовляют из германия, кремния, селена и других веществ.

Проведите под руководством учителя эксперимент. Соберите цепь, содержащую источник тока, реостат, амперметр, полупроводниковый диод и ключ. Замкните ключ. Измерьте силу тока. Разомкните ключ и подключите провода к другим полюсам источника тока. Замкните цепь и вновь измерьте силу тока. Сделайте выводы.

Рассмотрим, как создают *p—n*-переход, используя германий, обладающий проводимостью *n*-типа, с небольшой добавкой донорной примеси. Этот переход не удаётся получить путём механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками. Толщина же *p—n*-перехода должна быть не больше межатомных расстояний, поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Для создания полупроводникового диода полупроводник с примесью *p*-типа, содержащий атомы индия, нагревается до высокой температуры. Пары примеси *n*-типа (например, мышьяка) осаждаются на поверхность кристалла. Вследствие диффузии они внедряются в кристалл, и на поверхности кристалла с проводимостью *p*-типа образуется область с электронным типом проводимости (рис. 16.15).

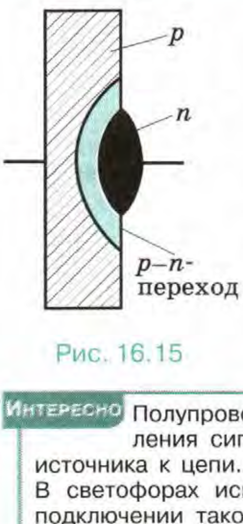


Рис. 16.15

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметичный металлический корпус.

Интересно Полупроводниковые диоды применяют в детекторах приёмников для выделения сигналов низкой частоты, для защиты от неправильного подключения источника к цепи.
В светофорах используются специальные полупроводниковые диоды. При прямом подключении такого диода происходит активная рекомбинация электронов и дырок. При этом выделяется энергия в виде светового излучения.

Схематическое изображение диода приведено на рисунке 16.16. Полупроводниковые выпрямители обладают высокой надёжностью и имеют большой

Рис. 16.16

срок службы. Однако они могут работать лишь в ограниченном интервале температур (от −70 до 125 °С).

Транзисторы. Ещё одно применение полупроводников с примесным типом проводимости — транзисторы — приборы, используемые для усиления электрических сигналов.

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введёнными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создаётся очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрометров) прослойка полупроводника n-типа между двумя слоями полупроводника p-типа (рис. 16.17). Эту тонкую прослойку называют *основанием* или *базой*.

В кристалле образуются два p—n-перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображённую на рисунке 16.17. В данной схеме при подключении батареи Б1 левый p—n-переход является *прямым*. Левый полупроводник с проводимостью p-типа называют *эмиттером*. Если бы не было правого p—n-перехода, в цепи эмиттер — база существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи Б1 и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер — база.

Батарея Б2 включена так, что правый n—p-переход в схеме (см. рис. 16.17) является *обратным*. Правая область с проводимостью p-типа называется *коллектором*. Если бы не было левого p—n-перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом p—n-переходе появляется ток и в цепи коллектора, причём сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере. (Если на эмиттер подано отрицательное напряжение, то левый p—n-переход будет обратным, и ток в цепи эмиттера и в цепи коллектора будет практически отсутствовать.)

Это объясняется следующим образом. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника p-типа (дырки) проникают в базу, где они являются уже *неосновными носителями*. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней

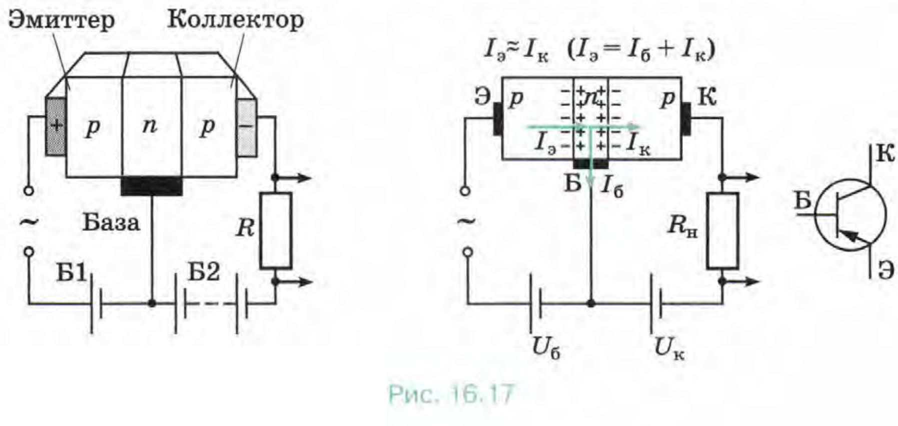


Рис. 16.17

невелико, попавшие в неё дырки почти не объединяются (не рекомбинируют) с электронами базы и проникают в коллектор за счёт диффузии. Правый p—n-переход закрыт для основных носителей заряда базы — электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (см. рис. 16.17) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер. Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включённого в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R.

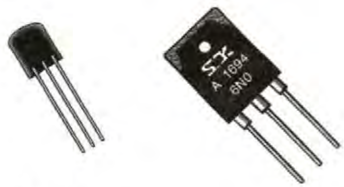
При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нём может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Поэтому на нагрузке R можно получить электрические сигналы, мощность которых во много раз превышает мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Применение транзисторов. Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах, включающих в себя колоссальное число транзисторов.

Интересно Первая интегральная схема поступила в продажу в 1964 г. Она содержала шесть элементов — четыре транзистора и два резистора. Современные микросхемы содержат миллионы транзисторов.

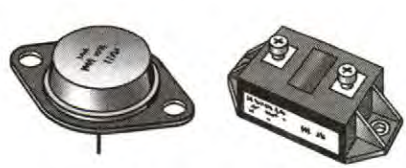
Компьютеры, составленные из микросхем и микропроцессоров, фактически изменили окружающий человека мир. В настоящее время не существует ни одной области человеческой деятельности, где компьютеры не служили бы активными помощниками человека. Например, в космических исследованиях или высокотехнологичных производствах работают микропроцессоры, уровень организации которых соответствует искусственному интеллекту.

Транзисторы (рис. 16.18, 16.19) получили чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменили электронные лампы в электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприёмники, в которых используются такие приборы, в обиходе называются транзисторами. Преимуществом транзисторов (так же как и полупроводниковых диодов) по сравнению с электронными лампами является



$I \approx 0{,}1$ А $\qquad I = 10$ А

Рис. 16.18



$I = 50$ А $\qquad I \approx 400$ А

Рис. 16.19

прежде всего отсутствие накалённого катода, потребляющего значительную мощность и требующего времени для его разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы.

Полупроводниковый диод. Транзистор

Найти

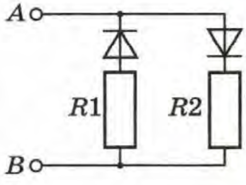
1. Что происходит в контакте двух проводников n- и p-типов?
2. Что такое запирающий слой?
3. Какой переход называют прямым?
4. Для чего служит полупроводниковый диод?
5. Почему база транзистора должна быть узкой?
6. Как надо включать в цепь транзистор, у которого база является полупроводником p-типа, а эмиттер и коллектор — полупроводниками n-типа?
7. Почему сила тока в коллекторе почти равна силе тока в эмиттере?

А1. Выберите фамилию нашего соотечественника, получившего Нобелевскую премию за исследование полупроводников, использующихся в лазерах, средствах мобильной связи.
1) Басов 2) Прохоров 3) Гинзбург 4) Алфёров

А2. Идеальный p—n-переход присоединён через металлические контакты к источнику тока так, что к p-полупроводнику присоединена отрицательная клемма источника. Если током неосновных носителей зарядов пренебречь, то ток
1) в p-области перехода обеспечивается в основном движением дырок, в n-области — электронов
2) в p-области перехода обеспечивается в основном движением электронов, в n-области — дырок
3) в p-области и n-области перехода обеспечивается в равной степени движением дырок и электронов
4) в p-области и n-области перехода не идёт

С3. Чему примерно равна концентрация носителей заряда в полупроводнике p-типа, если он получен добавлением трёхвалентного металла в германий (число атомов примеси составляет 0,01% от числа атомов германия в кристалле). Собственной проводимостью германия можно пренебречь, плотность его считайте равной 5400 кг/м^3. Молярная масса германия 0,0725 кг/моль.

С4. В цепи, изображённой на рисунке, сопротивление диодов в прямом направлении пренебрежимо мало, а в обратном многократно превышает сопротивление резисторов. При подключении к точке A положительного полюса, а к точке B отрицательного полюса батареи с ЭДС 12 В и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением потребляемая мощность равна 7,2 Вт. При изменении полярности подключения батареи потребляемая мощность оказалась равной 14,4 Вт.



Укажите условия прохождения тока через диоды и резисторы в обоих случаях и определите сопротивление резисторов в этой цепи.

§ 112 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Какое физическое явление называют постоянным током?
Каковы условия существования электрического тока?

До открытия уникальных свойств полупроводников в радиотехнике использовались исключительно электронные лампы.

Откачивая газ из сосуда (трубки), можно получить газ с очень малой концентрацией молекул.

Запомни Состояние газа, при котором молекулы успевают пролететь от одной стенки сосуда к другой, ни разу не испытав соударений друг с другом, называют **вакуумом.**

Если в сосуд с вакуумом поместить два электрода и подключить их к источнику тока, то ток между электродами не пойдёт, так как в вакууме нет носителей заряда. Следовательно, для создания тока в трубке должен быть источник заряженных частиц.

Термоэлектронная эмиссия. Чаще всего действие такого источника заряженных частиц основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны.

Запомни Явление испускания электронов нагретыми металлами называется **термоэлектронной эмиссией.**

Это явление можно рассматривать как испарение электронов с поверхности металла. У многих твёрдых веществ термоэлектронная эмиссия начинается при температурах, при которых испарение самого вещества ещё не происходит. Такие вещества и используются для изготовления катодов.

Односторонняя проводимость. Диод. Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны. Электроны образуют вокруг электрода *электронное облако.* Электрод заряжается положительно, и под влиянием электрического поля заряженного облака электроны из облака частично возвращаются на электрод.

В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод в секунду, равно числу электронов, возвратившихся на электрод за это время. Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

При подключении электродов к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника тока соединён с холодным электродом (анодом), а отрицательный — с нагретым (катодом), то вектор напряжённости электрического поля направлен к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток. При противоположной полярности включения источника напряжённость поля направлена от нагретого электрода к холодному. Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к нагретому электроду. Цепь оказывается разомкнутой.

Если в аноде электронной лампы сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пролетит в это отверстие, образуя за анодом электронный пучок. Количеством электронов в пучке можно управлять, поместив между катодом и анодом дополнительный электрод и изменяя его потенциал.

Интересно

Односторонняя проводимость широко использовалась раньше в электронных приборах с двумя электродами — *вакуумных диодах,* которые служили, как и полупроводниковые диоды, для выпрямления электрического тока. Однако в настоящее время вакуумные диоды практически не применяются.

Свойства электронных пучков и их применение. Испускаемые катодом потоки электронов, движущихся в вакууме, называют иногда *катодными лучами.*

Перечислим свойства электронных пучков (катодных лучей).

1) Электроны в пучке движутся по прямым линиям.

2) Электронный пучок, попадая на мишень, передаёт ей часть кинетической энергии, что вызывает её нагревание. В современной технике это свойство используют для электронной плавки в вакууме сверхчистых металлов.

3) При торможении быстрых электронов, попадающих на вещество, возникает *рентгеновское излучение.* Это явление используют в рентгеновских трубках.

4) Некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), бомбардируемые электронами, светятся. В настоящее время среди материалов этого типа (люминофоров) применяются такие, у которых в световую энергию превращается до 25% энергии электронного пучка.

5) Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Например, проходя между пластинами конденсатора, электроны отклоняются от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной (рис. 16.20).

6) Электронный пучок отклоняется также в магнитном поле. Пролетая над северным полюсом магнита, электроны отклоняются влево, а пролетая над южным, отклоняются вправо. Отклонение электронных потоков, идущих от Солнца, в магнитном поле Земли приводит к тому, что свечение газов верхних слоёв атмосферы (полярное сияние) наблюдается только у полюсов.

7) Электронные пучки обладают ионизирующей способностью.

8) Электронные пучки могут проходить сквозь очень тонкие металлические пластины толщиной 0,003—0,03 мм.

Электронно-лучевая трубка. Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение покрытого люминофором экрана под действием пучка применяют в электронно-лучевой трубке.

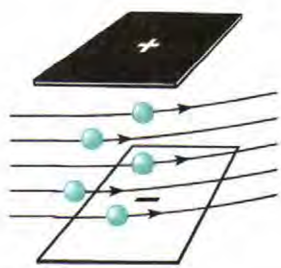


Рис. 16.20

Электронно-лучевая трубка была основным элементом первых телевизоров и осциллографа —

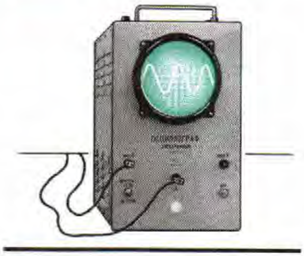


Рис. 16.21

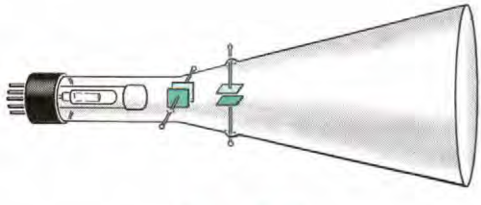


Рис. 16.22

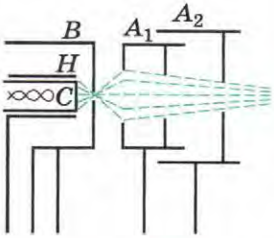


Рис. 16.23

прибора для исследования быстропеременных процессов в электрических цепях (рис. 16.21).

Устройство электронно-лучевой трубки показано на рисунке 16.22. Эта трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. В узком конце трубки помещён источник быстрых электронов — *электронная пушка* (рис. 16.23). Она состоит из катода, управляющего электрода и анода (чаще несколько анодов располагается друг за другом). Электроны испускаются нагретым оксидным слоем с торца цилиндрического катода C, окружённого теплозащитным экраном H. Далее они проходят через отверстие в цилиндрическом управляющем электроде B (он регулирует число электронов в пучке). Каждый анод (A_1 и A_2) состоит из дисков с небольшими отверстиями. Эти диски вставлены в металлические цилиндры. Между первым анодом и катодом создаётся разность потенциалов в сотни и даже тысячи вольт. Сильное электрическое поле ускоряет электроны, и они приобретают большую скорость. Форма, расположение и потенциалы анодов выбирают так, чтобы наряду с ускорением электронов осуществлялась и фокусировка электронного пучка, т. е. уменьшение площади поперечного сечения пучка на экране почти до точечных размеров.

На пути к экрану пучок последовательно проходит между двумя парами управляющих пластин, подобных пластинам плоского конденсатора (см. рис. 16.22). Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам он смещается в вертикальном направлении.

Одновременное использование двух пар пластин позволяет перемещать светящуюся точку по экрану в любом направлении. Так как масса электронов очень мала, то они почти мгновенно, т. е. за очень короткое время, реагируют на изменение разности потенциалов управляющих пластин.

Интересно В настоящее время чаще используются телевизоры с жидкокристаллическим или плазменным экраном.

В электронно-лучевой трубке, применяемой в телевизоре (так называемом кинескопе), управление пучком, созданным электронной пушкой, осуществляется с помощью магнитного поля. Это поле создают катушки, надетые на горловину трубки (рис. 16.24).

Цветной кинескоп содержит три разнесённые электронные пушки и экран мозаичной структуры, составленный из люминофоров трёх типов (красного, синего и зелёного свечения). Каждый электронный пучок возбуждает люминофоры одного типа, свечение которых в совокупности даёт на экране цветное изображение.

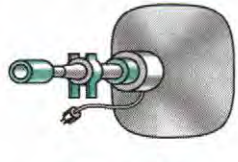


Рис. 16.24

Интересно

Электронно-лучевые трубки широко применялись в *дисплеях* — устройствах, присоединяемых к электронно-вычислительным машинам (ЭВМ). На экран дисплея, подобный экрану телевизора, поступала информация, записанная и переработанная ЭВМ. Можно было непосредственно видеть текст на любом языке, графики различных процессов, изображения реальных объектов, а также воображаемые объекты, подчиняющиеся законам, записанным в программе вычислительной машины.

Термоэлектронная эмиссия. Катодные лучи — Найти

1. Для какой цели в электронных лампах создают вакуум?
2. Наблюдается ли термоэлектронная эмиссия в диэлектриках?
3. Как осуществляется управление электронными пучками?
4. Как устроена электронно-лучевая трубка?

A1. Электронная пушка создаёт пучок электронов в стеклянной вакуумированной камере. Все электроны, покинувшие раскалённый катод пушки, покидают катод и ударяются в экран электронно-лучевой трубки. Если увеличить ускоряющее напряжение в пушке в 2 раза, то сила тока, идущего в вакууме через трубку,

1) не изменится
2) возрастёт примерно в $\sqrt{2}$ раза
3) возрастёт примерно в 2 раза
4) возрастёт примерно в 4 раза

A2. Вакуумный диод, у которого анод (положительный электрод) и катод (отрицательный электрод) — параллельные пластины, работает в режиме, когда между током и напряжением выполняется соотношение $I = aU^{3/2}$ (где a — некоторая постоянная величина). Линейная зависимость тока от напряжения (закон Ома) нарушается из-за

1) свойств электронного пучка
2) появления дополнительных носителей тока
3) того, что свойства анода и катода разные
4) движения электронов в вакууме

§ 113 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА

Каковы носители электрического тока в вакууме? Каков характер их движения?

Жидкости, как и твёрдые тела, могут быть диэлектриками, проводниками и полупроводниками. К диэлектрикам относится дистиллированная вода, к проводникам — растворы и расплавы электролитов: кислот, щелочей и солей. Жидкими полупроводниками являются расплавленный селен, расплавы сульфидов и др.

Электролитическая диссоциация. При растворении электролитов под влиянием электрического поля полярных молекул воды происходит распад молекул электролитов на ионы.

Запомни Распад молекул на ионы под влиянием электрического поля полярных молекул воды называется **электролитической диссоциацией.**
Степень диссоциации — доля в растворённом веществе молекул, распавшихся на ионы.

Степень диссоциации зависит от температуры, концентрации раствора и электрических свойств растворителя.

Важно С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов.

Предположите, как можно нарушить состояние динамического равновесия в растворе.

Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы.

При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся за секунду на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь объединяются в нейтральные молекулы.

Ионная проводимость.

Важно Носителями заряда в водных растворах или расплавах электролитов являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

Если сосуд с раствором электролита включить в электрическую цепь, то отрицательные ионы начнут двигаться к положительному электроду — аноду, а положительные — к отрицательному — катоду. В результате по цепи пойдёт электрический ток.

Запомни Проводимость водных растворов или расплавов электролитов, которая осуществляется ионами, называют **ионной проводимостью.**

Жидкости могут обладать и электронной проводимостью. Такой проводимостью обладают, например, жидкие металлы.

Электролиз. При ионной проводимости прохождение тока связано с переносом вещества. На электродах происходит выделение веществ, входящих в состав электролитов. На аноде отрицательно заряженные ионы отдают свои лишние электроны (в химии это называется окислительной реакцией), а на катоде положительные ионы получают недостающие электроны (восстановительная реакция).

Интересно

Жидкости могут обладать и электронной проводимостью. Такой проводимостью обладают, например, жидкие металлы.

Запомни

Процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, называют **электролизом.**

От чего зависит масса вещества, выделяющегося за определённое время? Очевидно, что масса m выделившегося вещества равна произведению массы m_{0i} одного иона на число N_i ионов, достигших электрода за время Δt:

$$m = m_{0i}N_i. \qquad (16.3)$$

Масса иона m_{0i} равна:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A}, \qquad (16.4)$$

где M — молярная (или атомная) масса вещества, а N_A — постоянная Авогадро, т. е. число ионов в одном моле.

Число ионов, достигших электрода, равно:

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}}, \qquad (16.5)$$

где $\Delta q = I\Delta t$ — заряд, прошедший через электролит за время Δt; q_{0i} — заряд иона, который определяется валентностью n атома: $q_{0i} = ne$ (e — элементарный заряд). При диссоциации молекул, например KBr, состоящих из одновалентных атомов ($n = 1$), возникают ионы K^+ и Br^-. Диссоциация молекул медного купороса ведёт к появлению двухзарядных ионов Cu^{2+} и SO_4^{2-} ($n = 2$). Подставляя в формулу (16.3) выражения (16.4) и (16.5) и учитывая, что $\Delta q = I\Delta t$, а $q_{0i} = ne$, получаем

$$m = \frac{M}{neN_A}I\Delta t. \qquad (16.6)$$

Закон Фарадея. Обозначим через k коэффициент пропорциональности между массой m вещества и зарядом $\Delta q = I\Delta t$, прошедшим через электролит:

$$k = \frac{1}{eN_A}\frac{M}{n} = \frac{1}{F}\frac{M}{n}, \qquad (16.7)$$

где $F = eN_A = 9{,}65 \cdot 10^4$ Кл/моль — *постоянная Фарадея.*

Коэффициент k зависит от природы вещества (значений M и n). Согласно формуле (16.6) имеем

$$\boxed{m = kI\Delta t.} \qquad (16.8)$$

Закон электролиза Фарадея

Масса вещества, выделившегося на электроде за время Δt при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока и времени.

Это утверждение, полученное нами теоретически, впервые было установлено экспериментально Фарадеем.

Запомни Величину k в формуле (16.8) называют **электрохимическим эквивалентом** данного вещества и выражают в *килограммах на кулон* (кг/Кл).

Важно Из формулы (16.8) видно, что коэффициент k численно равен массе вещества, выделившегося на электродах, при переносе ионами заряда, равного 1 Кл.

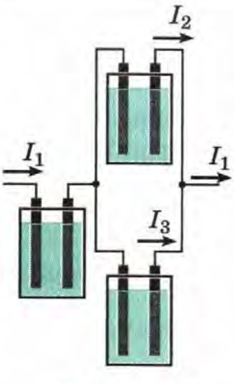


Рис. 16.25

Электрохимический эквивалент имеет простой физический смысл. Так как $M/N_A = m_{0i}$ и $en = q_{0i}$, то согласно формуле (16.7) $k = m_{0i}/q_{0i}$, т. е. k — отношение массы иона к его заряду.

Измеряя величины m и Δq, можно определить электрохимические эквиваленты различных веществ.

Убедиться в справедливости закона Фарадея можно на опыте. Соберём установку, показанную на рисунке 16.25. Все три электролитические ванны заполнены одним и тем же раствором электролита, но токи, проходящие через них, различны. Обозначим силы токов через I_1, I_2, I_3. Тогда $I_1 = I_2 + I_3$. Измеряя массы m_1, m_2, m_3 веществ, выделившихся на электродах в разных ваннах, можно убедиться, что они пропорциональны соответствующим силам токов I_1, I_2, I_3.

Предложите свою схему опыта, с помощью которого можно было бы проверить справедливость закона Фарадея. Проведите опыт.

Определение заряда электрона. Формулу (16.6) для массы выделившегося на электроде вещества можно использовать для определения заряда электрона. Из этой формулы вытекает, что модуль заряда электрона равен:

$$e = \frac{M}{mnN_A} I\Delta t. \qquad (16.9)$$

Зная массу m выделившегося вещества при прохождении заряда $I\Delta t$, молярную массу M, валентность n атомов и постоянную Авогадро N_A, можно найти значение модуля заряда электрона. Оно оказывается равным $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Именно таким путём и было впервые в 1874 г. получено значение элементарного электрического заряда.

Применение электролиза. Электролиз широко применяют в технике для различных целей. Электролитическим способом покрывают поверхность одного металла тонким слоем другого (*никелирование, хромирование, позолота* и т. п.). Это прочное покрытие защищает поверхность от коррозии. Если обеспечить хорошее отслаивание электролитического покрытия от поверхности, на которую осаждается металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), то можно получить копию с рельефной поверхности.

Процесс получения отслаиваемых покрытий — *гальванопластика* — был разработан русским учёным Б. С. Якоби (1801—1874), который в 1836 г.

применил этот способ для изготовления полых фигур для Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.

Интересно

Раньше в полиграфической промышленности копии с рельефной поверхности (стереотипы) получали с матриц (оттиск набора на пластичном материале), для чего осаждали на матрицы толстый слой железа или другого вещества. Это позволяло воспроизвести набор в нужном количестве экземпляров.

При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь анода растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы, выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь.

При помощи электролиза получают алюминий из расплава бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешёвым и наряду с железом самым распространённым в технике и быту.

С помощью электролиза получают электронные платы, служащие основой всех электронных изделий. На диэлектрик наклеивают тонкую медную пластину, на которую наносят особой краской сложную картину соединяющих проводов. Затем пластину помещают в электролит, где вытравливаются не закрытые краской участки медного слоя. После этого краска смывается, и на плате появляются детали микросхемы.

Токи в электролитах. Законы электролиза — Найти

1. Почему при прохождении тока по раствору электролита происходит перенос вещества, а при прохождении по металлическому проводнику перенос вещества не происходит?
2. В чём состоит сходство и различие собственной проводимости у полупроводников и у растворов электролитов?
3. Сформулируйте закон электролиза Фарадея.
4. Почему отношение массы вещества, выделившегося при электролизе, к массе иона равно отношению прошедшего заряда к заряду иона?

А1. Какими носителями заряда создаётся электрический ток в растворах и расплавах электролитов?
1) только электронами
2) электронами и дырками
3) только ионами
4) электронами и ионами

А2. Известно, что раствор соляной кислоты в воде проводит электрический ток. Это объясняется тем, что в растворе кислоты присутствуют
1) свободные ионы
2) свободные электроны
3) дырки
4) атомы металлов

А3. Известно, что раствор поваренной соли в воде хорошо проводит электрический ток, а раствор сахара в воде — плохо. Это объясняется тем, что при растворении соли в воде появляются
1) положительные ионы, а при растворении сахара — отрицательные ионы
2) свободные ионы, а при растворении сахара — электроны
3) свободные ионы, а при растворении сахара свободные ионы не появляются
4) появляются электроны, а при растворении сахара электроны не появляются

§ 114 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ. НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯДЫ

Опишите кратко механизм проводимости твёрдых и жидких тел, а также тока в вакууме.

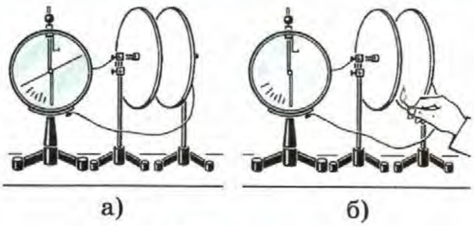


Рис. 16.26

Электрический разряд в газе. Возьмём электрометр с присоединёнными к нему дисками плоского конденсатора и зарядим его (рис. 16.26, *а*). При комнатной температуре, если воздух достаточно сухой, конденсатор разряжается очень медленно.

Это показывает, что электрический ток, вызываемый разностью потенциалов в воздухе между дисками, очень мал. Следовательно, электрическая проводимость воздуха при комнатной температуре мала и воздух можно считать диэлектриком.

Теперь нагреем воздух между дисками горящей спичкой (рис. 16.26, *б*). Заметим, что стрелка электрометра быстро приближается к нулю, значит, конденсатор разряжается. Следовательно, нагретый газ является проводником и в нём устанавливается электрический ток.

Запомни Процесс прохождения электрического тока через газ называют **газовым разрядом.**

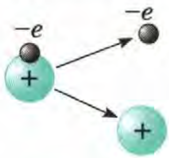


Рис. 16.27

Ионизация газов. При обычных условиях газы почти полностью состоят из нейтральных атомов или молекул и, следовательно, являются *диэлектриками*. Вследствие нагревания или воздействия излучением часть атомов *ионизуется* (рис. 16.27).

В газе могут образовываться и отрицательные ионы, которые появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам.

Запомни Процесс распада атомов и молекул на ионы и электроны называется **ионизацией.**

Ионизация газов при нагревании объясняется тем, что по мере нагревания молекулы движутся всё быстрее и быстрее. При этом некоторые молекулы начинают двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается, превращаясь в ионы. Чем выше температура, тем больше образуется ионов.

Интересно При комнатной температуре воздух является очень плохим проводником. При нагревании проводимость воздуха возрастает. Увеличение проводимости воздуха можно вызвать и иными способами, например действием излучений: ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного и др.

Проводимость газов. Механизм проводимости газов похож на механизм проводимости растворов и расплавов электролитов. Различие состоит в том, что отрицательный заряд переносится в основном не отрицательными ионами, как в водных растворах или расплавах электролитов, а электронами.

Важно Таким образом, в газах сочетается электронная проводимость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов или расплавов электролитов. Есть ещё одно различие. В растворах электролитов образование ионов происходит вследствие ослабления внутримолекулярных связей под действием молекул растворителя (молекул воды). В газах образование ионов происходит либо при нагревании, либо за счёт действия внешних ионизаторов, например излучений.

Рекомбинация. Если ионизатор перестанет действовать, то можно заметить, что заряженный электрометр снова будет сохранять заряд. Это показывает, что после прекращения действия ионизатора газ перестаёт быть проводником. Ток прекращается после того, как все ионы и электроны достигнут электродов. Кроме того, при сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь образовать нейтральный атом. Схематически это изображено на рисунке 16.28.

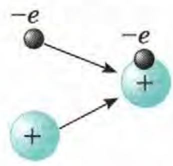


Рис. 16.28

Запомни Процесс образования из ионов и электронов нейтральных атомов и молекул называют **рекомбинацией** заряженных частиц.

В отсутствие внешнего поля заряженные частицы исчезают только вследствие рекомбинации, и газ становится диэлектриком. Если действие ионизатора не прерывается, то устанавливается динамическое равновесие, при котором среднее число вновь образующихся пар заряженных частиц равно среднему числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

Разряд в газе может происходить и без внешнего ионизатора.

Несамостоятельный разряд. Для исследования разряда в газе при различных давлениях удобно использовать стеклянную трубку с двумя электродами (рис. 16.29).

Запомни Если действие ионизатора прекратить, то прекратится и разряд. Такой разряд называют **несамостоятельным разрядом.**

Пусть с помощью какого-либо ионизатора в газе образуется в секунду определённое число пар заряженных частиц: положительных ионов и электронов.

При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы перемещаются к отрицательному электроду, а электроны и отрицательно заряженные ионы — к положительному электроду. В результате в трубке возникает электрический ток, т. е. происходит *газовый разряд.*

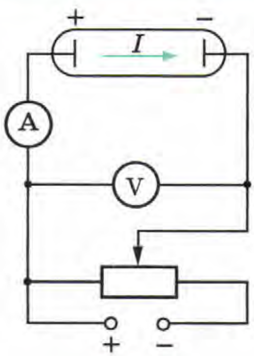


Рис. 16.29

Не все образующиеся ионы достигают электродов; часть их воссоединяется с электронами, образуя нейтральные молекулы газа. По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки доля за-

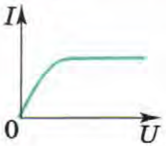


Рис. 16.30

ряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается. Возрастает и сила тока в цепи. Наконец наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе за секунду, достигают за это время электродов. При этом дальнейшего роста силы тока не происходит (рис. 16.30). Ток достигает *насыщения.*

Самостоятельный разряд. Что будет происходить с разрядом в газе, если продолжать увеличивать разность потенциалов на электродах?

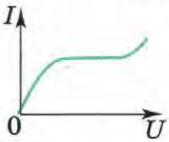


Рис. 16.31

Казалось бы, сила тока и при дальнейшем увеличении разности потенциалов должна оставаться неизменной. Однако опыт показывает, что в газах при увеличении разности потенциалов между электродами, начиная с некоторого её значения, сила тока снова возрастает (рис. 16.31). Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы помимо тех, которые образуются за счёт действия ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число ионов, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен для поддержания разряда. Если убрать внешний ионизатор, то разряд может не прекратиться.

Запомни Разряд, происходящий в газе без внешнего ионизатора, называется **самостоятельным разрядом.**

Ионизация электронным ударом. Каковы же причины резкого увеличения силы тока в газе при больших напряжениях?

Рассмотрим какую-либо пару заряженных частиц (положительный ион и электрон), образовавшуюся благодаря действию внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду — аноду, а положительный ион — к катоду. На своём пути электрон встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями кинетическая энергия электрона увеличивается за счёт работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряжённость электрического поля.

Кинетическая энергия электрона перед очередным столкновением пропорциональна напряжённости поля и длине l свободного пробега электрона (пути между двумя последовательными столкновениями):

$$\frac{mv^2}{2} = eEl. \tag{16.10}$$

Важно Если кинетическая энергия электрона превышает работу A_i, которую нужно совершить, чтобы ионизовать нейтральный атом, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} \geqslant A_i,$$

то при столкновении электрона с атомом происходит ионизация (рис. 16.32).

Запомни Процесс выбивания быстродвижущимся свободным электроном при соударении у нейтрального атома одного или нескольких электронов называют **ионизацией электронным ударом.**

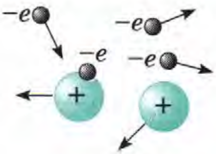


Рис. 16.32

В результате вместо одного свободного электрона образуются два (налетающий на атом и вырванный из атома). Эти электроны, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизуют встречные атомы и т. д. Число заряженных частиц резко возрастает, возникает электронная лавина.

Но одна ионизация электронным ударом не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Действительно, ведь все возникающие таким образом электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбывают из игры». Для существования разряда необходима эмиссия электронов с катода (напомним, что слово *эмиссия* означает «испускание»). Эмиссия электронов может быть обусловлена несколькими причинами. Положительные ионы, образовавшиеся при столкновении свободных электронов с нейтральными атомами, при своём движении к катоду приобретают под действием поля большую кинетическую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод с поверхности последнего выбиваются электроны.

Кроме того, катод может испускать электроны при нагревании его до высокой температуры. При самостоятельном разряде нагрев катода может происходить за счёт бомбардировки его положительными ионами, что происходит, например, при дуговом разряде.

Итак, в газах при больших напряжённостях электрических полей электроны достигают таких больших энергий, что начинается ионизация электронным ударом. Разряд становится самостоятельным и продолжается без внешнего ионизатора.

Интересно В разреженном газе самостоятельный разряд возникает при сравнительно небольших напряжениях. Благодаря малому давлению длина пробега электрона между двумя ударами велика, и он может приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов. При таком разряде газ светится, цвет свечения зависит от рода газа. Свечение, возникающее при тлеющем разряде, широко используется для рекламы, для освещения помещения лампами дневного света.

Токи в газах. Эмиссия электронов. Ионизация газов Найти

1. В чём различие между диссоциацией электролитов и ионизацией газов?
2. Что такое рекомбинация?
3. Почему после прекращения действия ионизаторов газ снова становится диэлектриком?
4. При каких условиях несамостоятельный разряд в газах превращается в самостоятельный?
5. Почему ионизация электронным ударом не может обеспечить существование разряда в газах?

§ 115 ПЛАЗМА

Назовите три состояния вещества, с которыми вы познакомились ранее. Чем характерно каждое из этих состояний?

Интересно Слово «плазма» произошло от греческого слова plasma — оформленное. Первоначально это слово начали употреблять в биологии для обозначения бесцветных жидких компонентов крови и живых тканей. В физике слово *плазма* приобрело другой смысл.

При очень низких температурах все вещества находятся в твёрдом состоянии. Их нагревание вызывает переход веществ из твёрдого состояния в жидкое. Дальнейшее повышение температуры приводит к превращению жидкостей в газ.

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счёт столкновений быстродвижущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое *плазмой*.

Запомни **Плазма** — это частично или полностью ионизованный газ, в котором локальные плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают.

Таким образом, плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Интересно Древние философы считали, что основу мироздания составляют четыре стихии: земля, вода, воздух и огонь. В известном смысле это отвечает принятому ныне делению на агрегатные состояния вещества, причём четвёртой стихии — огню и соответствует, очевидно, плазма.

Свойства плазмы. Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать её как особое, четвёртое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока электрическая нейтральность не восстановится и электрическое поле не станет равным нулю.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому наряду с беспорядочным (тепловым) движением частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени её ионизации. При высоких температурах полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Плазма в космическом пространстве. В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звёзды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

Интересно

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны различными излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма*.

Из плазмы состоит и межзвёздная среда, заполняющая пространство между звёздами и галактиками. Плотность межзвёздной среды очень мала — в среднем менее одного атома на 1 $см^3$. Ионизация атомов межзвёздной среды вызывается излучением звёзд и космическими лучами — потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звёзд температура межзвёздной плазмы очень мала.

Плазмой окружена и наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100—300 км представляет собой ионизованный газ — *ионосферу*. Ионизация воздуха в верхнем слое атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Радиационные пояса также состоят из плазмы. Многими свойствами плазмы обладают свободные электроны в металлах. В отличие от обычной плазмы в плазме твёрдого тела положительные ионы не могут перемещаться по всему телу.

Плазма. Свойства плазмы. Значение плазмы. Ионосфера

Найти

?

1. Из каких частиц состоит плазма?
2. Как получить плазму?
3. От чего зависит степень ионизации плазмы?
4. Как плазма проводит электрический ток?
5. Каково значение плазмы?

A1. Высокая степень ионизации ионосферы определяется
1) температурой
2) ионизацией за счёт соударений молекул
3) солнечным коротковолновым излучением
4) замедленными процессами рекомбинации

A2. Плазма обладает
1) малой электропроводностью, так как суммарный заряд в малом объёме равен нулю
2) устойчивостью
3) бо́льшим числом электронов по сравнению с числом ионов
4) большой электропроводностью

§ 116 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ»

Наиболее просты количественные закономерности для электрического тока в металлах и электролитах.

Задачи на закон Ома, который выполняется для этих проводников, были приведены в главе 15. В данной главе преимущественно рассматриваются задачи на применение закона электролиза. Кроме того, при решении некоторых задач надо использовать формулу (16.1) для зависимости сопротивления металлических проводников от температуры.

Задача 1. Проводящая сфера радиусом $R = 5$ см помещена в электролитическую ванну, наполненную раствором медного купороса. Насколько увеличится масса сферы, если отложение меди длится $t = 30$ мин, а электрический заряд, поступающий на каждый квадратный сантиметр поверхности сферы за 1 с, $q = 0{,}01$ Кл? Молярная масса меди $M = 0{,}0635$ кг/моль.

Решение. Площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2 = 314$ см^2. Следовательно, заряд, перенесённый ионами за $t = 30$ мин $= 1800$ с, равен $\Delta q = qSt = 0{,}01$ Кл/(см$^2 \cdot$ с) $\cdot$ 314 см$^2 \cdot$ 1800 с $= 5652$ Кл. Масса выделившейся меди равна:

$$m = \frac{M}{neN_A}\Delta q \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Задача 2. При электролизе, длившемся в течение одного часа, сила тока была равна 5 А. Чему равна температура выделившегося атомарного водорода, если при давлении, равном 10^5 Па, его объём равен 1,5 л? Электрохимический эквивалент водорода $k = 1{,}0 \cdot 10^{-8}\,\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Решение. По закону Фарадея масса m выделившегося водорода:

$$m = kIt. \qquad (1)$$

Из уравнения Менделеева—Клапейрона $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$, где R — универсальная газовая постоянная, $R = 8{,}31\,\frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \cdot \text{К}$; M — молярная масса атомарного водорода, определим массу водорода, полученного при электролизе:

$$m = \frac{pVM}{TR}. \qquad (2)$$

Из выражений (1) и (2) определим температуру: $T = \frac{pVM}{RkIt} \approx 100$ К.

Задача 3. При никелировании изделия в течение 1 ч отложился слой никеля толщиной $l = 0{,}01$ мм. Определите плотность тока, если молярная масса никеля $M = 0{,}0587$ кг/моль, валентность $n = 2$, плотность никеля $\rho = 8{,}9 \cdot 10^3\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Решение. Согласно закону электролиза Фарадея масса выделившегося на катоде никеля

$$m = \frac{1}{F}\frac{M}{n}It, \qquad (1)$$

где $m = \rho V = \rho lS$, а $I = jS$, где S — площадь покрытия никелем; F — постоянная Фарадея, $F = 9{,}65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$. Подставив выражения для массы никеля и силы тока I в формулу (1), получим $\rho lS = \frac{1}{F}\frac{M}{n}jSt$, откуда $j = \frac{\rho lFn}{Mt} \approx 81\,\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Задача 4. Определите электрическую энергию, затраченную на получение серебра массой 200 г, если КПД установки 80%, а электролиз проводят при напряжении 20 В. Электрохимический эквивалент серебра равен $k = 1{,}118 \cdot 10^{-6}\,\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Решение. Энергия, идущая только на электролиз, равна:

$$W'_э = qU. \qquad (1)$$

Согласно закону Фарадея $m = kq$, откуда $q = \frac{m}{k}$.

Подставив выражение для q в формулу (1), получим $W'_э = \frac{m}{k}U$.

Полная затраченная энергия $W_э$ связана с $W'_э$ выражением $W'_э = \frac{\eta}{100\%} \cdot W_э$, следовательно, $W_э = \frac{100\%}{\eta}\frac{m}{k}U = 4{,}47 \cdot 10^6$ Дж.

Задача 5. Объясните, почему при дуговом разряде при увеличении силы тока напряжение уменьшается.

Решение. При увеличении силы тока возрастает термоэлектронная эмиссия с катода, носителей заряда становится больше, а следовательно, сопротивление промежутка между электродами уменьшается. При этом уменьшение сопротивления происходит быстрее, чем увеличение силы тока (в газах нарушается линейный закон Ома $U = IR$), поэтому напряжение уменьшается.

Задача 6. Покажите, что при упругом столкновении электрона с молекулой электрон передаёт ей меньшую энергию, чем при абсолютно неупругом ударе.

Решение. При прямом абсолютно упругом столкновении электрона с молекулой выполняются законы сохранения энергии и импульса:

$$\frac{m_e v_0^2}{2} = \frac{m_e v_1^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2},$$

$$m_e v_0 = m_e v_1 + m v_2,$$

где m_e и m — массы электрона и молекулы; v_1 и v_2 — их скорости после столкновения. Решая эту систему относительно v_1 и v_2, получаем $v_2 = \frac{2m_e v_0}{m_e + m}$.

Энергия, передаваемая молекуле, $\Delta W = \frac{mv_2^2}{2} = \frac{m_e v_0^2}{2} \frac{4mm_e}{(m_e + m)^2}$. Так как $m_e << m$, то можно записать, что $(m_e + m)^2 \approx m^2$. Тогда $\Delta W \approx \frac{4m_e}{m} \frac{m_e v_0^2}{2}$.

Из полученного выражения следует, что молекуле передаётся очень маленькая часть первоначальной энергии электрона, так как $m_e << m$.

При неупругом столкновении выполняется только закон сохранения импульса $m_e v_0 = (m + m_e)v$, и, таким образом, электрон теряет энергию

$$\Delta W_э = \frac{m_e v_0^2}{2} - \frac{m_e v^2}{2} = \frac{m_e v_0^2}{2}\left(1 - \left(\frac{m_e}{m + m_e}\right)^2\right).$$

Так как $m_e << m$, мы можем считать, что дробь в скобках равна нулю, откуда $\Delta W_э \approx \frac{m_e v_0^2}{2}$, т. е. при неупругом столкновении электрон полностью передаёт свою энергию молекуле.

Задачи для самостоятельного решения

1. Однородное электрическое поле напряжённостью E создано в металле и в вакууме. Одинаковое ли расстояние пройдёт за одно и то же время электрон в том и другом случаях? Начальная скорость электрона равна нулю.

2. Длинная проволока, на концах которой поддерживается постоянное напряжение, накалилась докрасна. Половину проволоки опустили в холодную воду. Почему часть проволоки, оставшаяся над водой, нагревается сильнее?

3. Спираль электрической плитки перегорела и после соединения концов оказалась несколько короче. Как изменилось количество теплоты, выделяемой плиткой за единицу времени?

4. Алюминиевая обмотка электромагнита при температуре 0 °С потребляет мощность 5 кВт. Чему будет равна потребляемая мощность, если во время работы температура обмотки повысится до 60 °С, а напряжение останется неизменным? Что будет, если неизменной останется сила тока в обмотке? Температурный коэффициент сопротивления алюминия $3{,}8 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

5. Концентрация электронов проводимости в кремнии при комнатной температуре $n_1 = 10^{17}$ м$^{-3}$, а при 700 °С — $n_2 = 10^{24}$ м$^{-3}$. Какую часть составляет число электронов проводимости от общего числа атомов кремния? Плотность кремния 2300 кг/м^3.

6. Для получения примесной проводимости применяют индий, мышьяк, фосфор, галлий, сурьму, висмут. Какие из этих элементов можно ввести в качестве примеси в кремний, чтобы получить электронную проводимость?

7. Какой тип полупроводника получится, если в кремний ввести небольшое количество алюминия?

8. Для покрытия цинком металлических изделий в электролитическую ванну помещён цинковый электрод массой $m = 0{,}01$ кг. Какой заряд должен пройти через ванну, чтобы электрод был полностью израсходован? Электрохимический эквивалент цинка $k = 3{,}4 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл.

9. При силе тока 1,6 А на катоде электролитической ванны за 10 мин отложилась медь массой 0,316 г. Определите электрохимический эквивалент меди.

10. Определите количество выделившегося на катоде при электролизе алюминия (электролит Al_2SO_4), если затрачена энергия 20 кВт · ч при напряжении на электродах 12 В, КПД установки 80%. Электрохимический эквивалент алюминия $k = 9{,}3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

11. Как надо расположить электроды, чтобы электролитически покрыть внутреннюю поверхность полого металлического предмета?

12. При никелировании детали в течение 2 ч сила тока, проходящего через ванну, была 25 А. Электрохимический эквивалент никеля $k = 3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл, его плотность $\rho = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3. Чему равна толщина слоя никеля, выделившегося на детали, если площадь детали $S = 0{,}2$ м^2?

13. Определите скорость электронов при выходе из электронной пушки в двух случаях — при разности потенциалов между анодом и катодом 500 В и 5000 В.

Повторите материал главы 16 по следующему плану:

1. Выпишите основные понятия и физические величины и дайте им определение.
2. Сформулируйте законы и запишите основные формулы.
3. Укажите единицы физических величин и их выражение через основные единицы СИ.
4. Опишите основные опыты, подтверждающие справедливость законов.

«Токи в газах»

1. Тлеющий разряд и его использование в рекламе.
2. Дуговой разряд. Дуговая сварка.
3. Искровой и коронный разряды. Молния. Громоотвод.
4. Плазма и её использование.

«Экспериментальное исследование свойств полупроводникового диода»
«Моделирование установки для покрытия металлических изделий различной формы слоем другого металла»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ[1]

Введение

Всё, что сказано в этом введении, запоминать не нужно. Это справочный материал, к которому вы будете обращаться при выполнении лабораторных работ.

1. Как определять погрешности измерений

Выполнение лабораторных работ связано с измерением различных физических величин и последующей обработкой их результатов.

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путём с помощью средств измерения.

Прямое измерение — определение значения физической величины непосредственно средствами измерения.

Косвенное измерение — определение значения физической величины по формуле, связывающей её с другими физическими величинами, определяемыми прямыми измерениями.

Введём следующие обозначения: A, B, C, ... — *физические величины.*

$A_{пр}$ — *приближённое значение физической величины,* т. е. значение, полученное путём прямых или косвенных измерений.

ΔA — *абсолютная погрешность измерения физической величины.*

ε — *относительная погрешность измерения физической величины,* равная

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{пр}} \cdot 100\%.$$

$\Delta_и A$ — *абсолютная инструментальная погрешность,* определяемая конструкцией прибора (погрешность средств измерения; табл. 1).

$\Delta_о A$ — *абсолютная погрешность отсчёта* (получающаяся от недостаточно точного отсчёта показаний средств измерения); она равна в большинстве случаев половине цены деления, при измерении времени — цене деления секундомера или часов.

Таблица 1

Абсолютные инструментальные погрешности средств измерения

№ п/п	Средства измерения	Предел измерения	Цена деления	Абсолютная инструментальная погрешность
1	Линейка			
	ученическая	до 50 см	1 мм	± 1 мм
	чертёжная	до 50 см	1 мм	± 0,2 мм
	инструментальная (стальная)	20 см	1 мм	± 0,1 мм
	демонстрационная	100 см	1 см	± 0,5 см

[1] Инструкции к лабораторным работам составлены А. Б. Долицким, А. З. Синяковым и Н. А. Парфентьевой при участии Ю. И. Дика и Г. Г. Никифорова.

Продолжение

№ п/п	Средства измерения	Предел измерения	Цена деления	Абсолютная инструментальная погрешность
2	Лента измерительная	150 см	0,5 см	± 0,5 см
3	Измерительный цилиндр	до 250 мм	1 мл	± 1 мл
4	Штангенциркуль	150 мм	0,1 мм	± 0,05 мм
5	Микрометр	25 мм	0,01 мм	± 0,005 мм
6	Динамометр учебный	4 Н	0,1 Н	± 0,05 Н
7	Весы учебные	200 г	—	± 0,01 г
8	Секундомер	0—30 мин	0,2 с	± 1 с за 30 мин
9	Барометр-анероид	720—780 мм рт. ст.	1 мм рт. ст.	± 3 мм рт. ст.
10	Термометр лабораторный	0—100 °С	1 °С	± 1 °С
11	Амперметр школьный	2 А	0,1 А	± 0,05 А
12	Вольтметр школьный	6 В	0,2 В	± 0,15 В

Максимальная абсолютная погрешность прямых измерений складывается из абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчёта при отсутствии других погрешностей:

$$\Delta A = \Delta_{и} A + \Delta_{о} A.$$

Абсолютную погрешность измерения обычно округляют до одной значащей цифры ($\Delta A = 0{,}17 \approx 0{,}2$); числовое значение результата измерения округляют так, чтобы его последняя цифра оказалась в том же разряде, что и цифра погрешности ($A = 10{,}332 \approx 10{,}3$).

Результаты повторных измерений физической величины A, проведённых при одних и тех же контролируемых условиях и при использовании достаточно чувствительных и точных (с малыми погрешностями) средств измерения, обычно отличаются друг от друга. В этом случае $A_{пр}$ находят как среднее арифметическое значение всех измерений, а погрешность ΔA (её называют случайной погрешностью) определяют методами математической статистики.

В школьной лабораторной практике такие средства измерения практически не используются. Поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо определять максимальные погрешности измерения физических величин. Для получения результата достаточно одного измерения.

Относительная погрешность косвенных измерений определяется так, как показано в таблице 2.

Таблица 2

Формулы для вычисления относительной погрешности косвенных измерений

№ п/п	Формула для физической величины	Формула для относительной погрешности
1	$A = BCD$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D}$
2	$A = \frac{B}{CD}$	
3	$A = B + C$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$
4	$A = B\sqrt{\frac{C}{D}}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{2}\frac{\Delta C}{C} + \frac{1}{2}\frac{\Delta D}{D}$

Абсолютная погрешность косвенных измерений определяется по формуле $\Delta A = A_{пр}\varepsilon$ (ε выражается десятичной дробью).

2. О классе точности электроизмерительных приборов

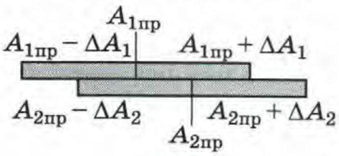
Для определения абсолютной инструментальной погрешности прибора надо знать его *класс точности*. Класс точности $\gamma_{пр}$ измерительного прибора показывает, сколько процентов составляет абсолютная инструментальная погрешность $\Delta_и A$ от всей шкалы прибора (A_{max}):

$$\gamma = \frac{\Delta_и A}{A_{max}} \cdot 100\%.$$

Класс точности указывают на шкале прибора или в его паспорте (знак % при этом не пишут). Существуют следующие классы точности электроизмерительных приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Зная класс точности прибора ($\gamma_{пр}$) и всю его шкалу (A_{max}), определяют абсолютную погрешность $\Delta_и A$ измерения физической величины A этим прибором:

$$\Delta_и A = \frac{\gamma_{пр} A_{max}}{100}.$$

3. Как сравнивать результаты измерений



Л.1

1. Записать результаты измерений в виде двойных неравенств:

$A_{1пр} - \Delta A_1 < A_{1пр} < A_{1пр} + \Delta A_1$,
$A_{2пр} - \Delta A_2 < A_{2пр} < A_{2пр} + \Delta A_2$.

2. Сравнить полученные интервалы значений (рис. Л.1): если интервалы не перекрываются, то результаты неодинаковы; если перекрываются, одинаковы при данной относительной погрешности измерений.

4. Как оформлять отчёт о проделанной работе

1. Лабораторная работа № ...
2. Наименование работы.
3. Цель работы.

4. Чертёж (если требуется).
5. Формулы искомых величин и их погрешностей.
6. Таблица результатов измерений и вычислений.
7. Окончательный результат, вывод и пр. (согласно цели работы).

5. Как записывать результат измерения

$A = A_{пр} \pm \Delta A$,

$\varepsilon = ... \%$.

№ 1. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ

Цель работы: определить центростремительное ускорение шарика при его равномерном движении по окружности.

Теоретическая часть.

Эксперименты проводятся с коническим маятником. Небольшой шарик движется по окружности радиусом R. При этом нить AB, к которой прикреплён шарик, описывает поверхность прямого кругового конуса. Из кинематических соотношений следует, что $a_n = \omega^2 R = 4\pi^2 R/T^2$.

На шарик действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{F}$ (рис. Л.2, *а*). Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}$. Разложив силу $\vec{F}$ на составляющие $\vec{F_1}$ и $\vec{F_2}$, направленные по радиусу к центру окружности и по вертикали вверх, второй закон Ньютона запишем следующим образом: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F_1} + \vec{F_2}$. Тогда можно записать: $ma_n = F_1$. Отсюда $a_n = F_1/m$.

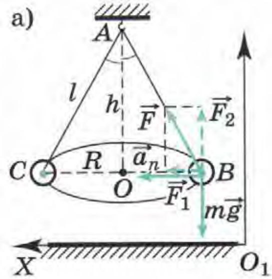
Модуль составляющей F_1 можно определить, пользуясь подобием треугольников OAB и F_1FB: $F_1/R = mg/h$ ($|m\vec{g}| = |\vec{F_2}|$). Отсюда $F_1 = mgR/h$ и $a_n = gR/h$.

Сопоставим все три выражения для a_n:

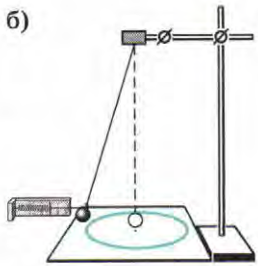
$$a_n = 4\pi^2 R/T^2, \qquad a_n = gR/h, \qquad a_n = F_1/m$$

и убедимся, что числовые значения центростремительного ускорения, полученные тремя способами, примерно одинаковы.

а)



б)



Л.2

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, лента измерительная, циркуль, динамометр лабораторный, весы с разновесами, шарик на нити, кусочек пробки с отверстием, лист бумаги, линейка.

Порядок выполнения работы.

1. Определите массу шарика на весах с точностью до 1 г.
2. Нить проденьте сквозь отверстие в пробке и зажмите пробку в лапке штатива (рис. Л.2, *б*).
3. Начертите на листе бумаги окружность, радиус которой около 20 см. Измерьте радиус с точностью до 1 см.

4. Штатив с маятником расположите так, чтобы продолжение нити проходило через центр окружности.

5. Взяв нить пальцами у точки подвеса, вращайте маятник так, чтобы шарик описывал такую же окружность, как и начерченная на бумаге.

6. Отсчитайте время, за которое маятник совершает заданное число (например, в интервале от 30 до 60) оборотов.

7. Определите высоту конического маятника. Для этого измерьте расстояние по вертикали от центра шарика до точки подвеса (считаем $h \approx l$).

8. Найдите модуль центростремительного ускорения по формулам

$$a_n = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \text{ и } a_n = \frac{gR}{h}.$$

9. Оттяните горизонтально расположенным динамометром шарик на расстояние, равное радиусу окружности, и измерьте модуль составляющей $\vec{F_1}$. Затем вычислите ускорение по формуле $a_n = \frac{F_1}{m}$.

10. Результаты измерений (в СИ) и вычислений занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Номер опыта	R, м	N	Δt, с	$T = \frac{\Delta t}{N}$, с	h, м	m, кг	$a_n = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$, м/с^2	$a_n = \frac{gR}{h}$, м/с^2	$a_n = \frac{F_1}{m}$, м/с^2

Сравнивая полученные три значения модуля центростремительного ускорения, убеждаемся, что они примерно одинаковы.

№ 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы: определить жёсткость пружины, а также исследовать зависимость жёсткости от толщины проволоки, из которой изготовлена пружина.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, пружинный динамометр, пружина, отличающаяся по толщине проволоки от пружины динамометра, три груза, линейка.

Порядок выполнения работы.

1. Укрепите динамометр на штативе.

2. Измерьте динамометром вес первого, второго и третьего грузов, а линейкой удлинение x пружины динамометра в каждом случае.

3. Укрепите на штативе пружину, поставьте рядом линейку, запишите значение высоты h_0, на которой находится нижний конец пружины в недеформированном состоянии.

4. Поочерёдно подвесьте грузы и определите положение нижнего конца пружины (высоту h_i) в трёх случаях.

5. Используя полученные данные и учитывая, что в нашем случае $F_{упр} = P$, сделайте расчёты.

6. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Номер опыта	P, Н	x, мм	h_0, мм	h_i, мм	Δh_i, мм	$k_1 = \frac{P}{x}$, Н/м	$k_{1ср}$, Н/м	$k_2 = \frac{P}{\Delta h_i}$, Н/м	$k_{2ср}$, Н/м

Сделайте вывод о зависимости жёсткости от толщины проволоки, из которой изготовлена пружина.

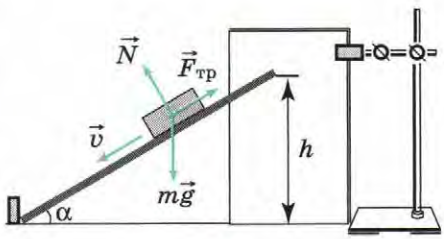
№ 3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Цель работы: определить коэффициент трения скольжения и его зависимость от свойств поверхности.

Теоретическая часть.

Сила трения скольжения направлена в сторону, противоположную относительной скорости тел, и равна произведению коэффициента трения μ и силы нормального давления N: $F_{тр} = \mu N$.

На тело, равномерно движущееся по наклонной плоскости, действуют сила тяжести, сила нормального давления и сила трения (рис. Л.3). Сумма сил, действующих на тело, при равномерном движении равна нулю: $m\vec{g} + \vec{F}_{тр} + \vec{N} = 0$. Следовательно, $N = mg\cos\alpha$.



Л.3

Воспользовавшись выражением $F_{тр} = \mu N$, можно записать: $mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha = 0$, тогда $\mu = \mathrm{tg}\alpha$.

Таким образом, измерив угол, при котором тело начинает скользить по наклонной плоскости, мы можем определить коэффициент трения.

Оборудование: доска, два разных бруска, различающиеся по гладкости поверхностей, лист плотной бумаги, штатив, линейка.

Порядок выполнения работы.

1. Измерьте длину l доски.
2. На штативе укрепите кусок плотной бумаги, как показано на рисунке Л.3. Нижний конец листа должен касаться стола.
3. Положите первый брусок на доску.
4. Один конец доски не должен двигаться, поэтому прижмите его к какой-нибудь опоре, например к стопке книг. Начинайте медленно поднимать доску за другой конец.

Зафиксируйте, на какой высоте будет находиться конец доски, при которой брусок начнёт скользить. Проведите на бумаге черту.

5. Измерьте расстояние h_1 на бумаге от нижнего края до черты.
6. Повторите опыт три раза.

7. Проведите аналогичные опыты со вторым бруском и измерьте расстояние h_2.

8. Сделайте расчёт основания наклонной плоскости для каждого случая по формуле $d = \sqrt{l^2 - h^2}$ и коэффициента трения по формуле $\mu = \operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{d}$.

9. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 5.

Таблица 5

Номер опыта	l, см	h_1, см	h_2, см	d_1, см	μ_1	$\mu_{1ср}$	d_2, см	μ_2	$\mu_{2ср}$

10. Переверните брусок на другую грань и повторите опыт. Проверьте, существенно ли различается высота подъёма конца доски, при которой брусок начинает скользить. Сделайте вывод.

№ 4. ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Цель работы: проверить закон независимости движений на примере движения тела, брошенного горизонтально.

Оборудование: небольшой шарик, жёлоб, линейка, секундомер, указка, ящик с песком.

Порядок выполнения работы.

Работу должны выполнять двое учащихся.

1. Поставьте на поверхность стола жёлоб, по которому будет катиться шарик, таким образом, чтобы его конец совпал с концом стола.

2. Измерьте высоту h, с которой будет падать шарик, как только он оторвётся от поверхности жёлоба.

3. Первый учащийся ударяет указкой по шарику так, чтобы он двигался по жёлобу.

Второй учащийся включает секундомер, когда шарик оторвётся от жёлоба, и выключает, когда услышит удар о пол.

4. Два раза, изменив силу, с которой вы ударяете шарик, измените его скорость. Измерьте время падения шарика.

5. Поставьте ящик с песком в месте, где предположительно упадёт шарик. Ударьте по шарику и определите расстояние l от стола до точки падения.

6. Передвиньте ящик и ударьте по шарику слабее. Измерьте расстояние от стола то точки падения шарика.

7. Зная высоту h, с которой падал шарик, и ускорение свободного падения, вычислите время движения шарика $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Сравните рассчитанное значение времени падения со средним временем падения, определённым из опыта. Сделайте вывод.

8. Определите из формулы $l = v_0 t$ начальную скорость шарика для каждого из измеренных значений дальности полёта.

9. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 6.

Таблица 6

Номер опыта	h, см	t_i, с	$t_{ср}$, с	$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$, с	l_i, см	$v_i = \frac{l_i}{t_{ср}}$, см/с

Выбрав правильный масштаб по осям OX и OY и воспользовавшись уравнением траектории $y = h - \frac{g}{2v_0^2}x^2$, постройте траекторию движения шарика для одного из найденных значений начальной скорости.

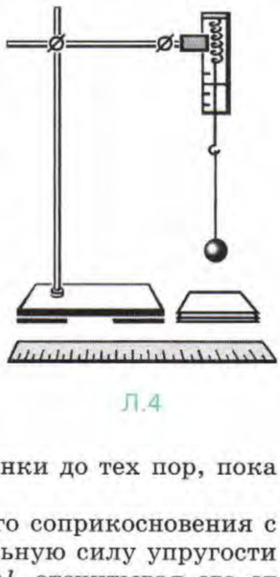
№ 5. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: научиться измерять потенциальную энергию поднятого над землёй тела и деформированной пружины; сравнить два значения потенциальной энергии системы.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, динамометр лабораторный, линейка, груз массой m на нити длиной l, набор картонок толщиной порядка 2 мм, краска и кисточка.

Указания к работе.

Для выполнения работы собирают установку, показанную на рисунке Л.4. Динамометр укрепляется в лапке штатива.



Л.4

Порядок выполнения работы.

1. Привяжите груз к одному концу нити, другой конец нити привяжите к крючку динамометра и измерьте вес груза $F_т = mg$ (в данном случае вес груза равен силе тяжести).
2. Измерьте длину l нити, на которой привязан груз.
3. На нижний конец груза нанесите немного краски.
4. Поднимите груз до точки закрепления нити к крючку динамометра.
5. Отпустите груз и убедитесь по отсутствию краски на столе, что груз не касается его при падении.
6. Повторяйте опыт, каждый раз подкладывая картонки до тех пор, пока на верхней картонке не появятся следы краски.
7. Взявшись за груз рукой, растяните пружину до его соприкосновения с верхней картонкой и измерьте динамометром максимальную силу упругости $F_{упр}$ и линейкой максимальное растяжение пружины Δl, отсчитывая его от нулевого деления динамометра.
8. Вычислите высоту, с которой падает груз: $h = l + \Delta l$ (это высота, на которую смещается центр тяжести груза).
9. Вычислите потенциальную энергию поднятого груза:

$$E'_п = mg(l + \Delta l).$$

10. Вычислите энергию деформированной пружины:

$$E''_{п} = k\frac{\Delta l^2}{2}, \text{ где } k = \frac{F_{упр}}{\Delta l}.$$

Подставив выражение для k в формулу для энергии $E''_{п}$, получим

$$E''_{п} = F_{упр}\frac{\Delta l}{2}.$$

11. Результаты измерений (в СИ) и вычислений занесите в таблицу 7.

Таблица 7

$F_т = mg$, Н	l, м	Δl, м	$F_{упр}$, Н	$h = l + \Delta l$, м	$E'_{п} = mg(l + \Delta l)$, Дж	$E''_{п} = F_{упр}\frac{\Delta l}{2}$, Дж

12. Сравните значения энергий $E'_{п}$ и $E''_{п}$. Подумайте, почему значения этих энергий совпадают не совсем точно.

№ 6. ИЗУЧЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

Цель работы: убедиться в правильности первого и второго условий равновесия.

Теоретическая часть.

Для равновесия твёрдого тела необходимо и достаточно выполнение двух условий:

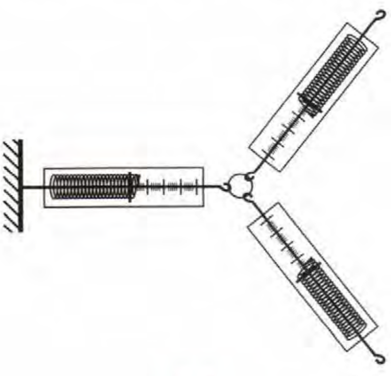
1) векторная сумма внешних сил, действующих на тело, должна быть равна нулю:

$$\vec{F_1} + \vec{F_2} + \ldots = 0;$$

2) алгебраическая сумма моментов сил, действующих на твёрдое тело, относительно оси вращения должна быть равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \ldots = 0.$$

Момент силы считается положительным, если сила вызывает вращение против часовой стрелки, и отрицательным, если сила вызывает вращение по часовой стрелке.



Л.5

Оборудование: три динамометра, небольшое колечко, набор грузиков, планка с отверстиями, штатив, транспортир.

Порядок выполнения работы.

Проверьте первое условие равновесия.

1. Укрепите конец одного из динамометров (рис. Л.5). Второй его конец зацепите за кольцо.

2. Зацепите два других динамометра за это же кольцо и тяните таким образом, чтобы два последних динамометра образовывали прямой угол. Когда кольцо станет неподвижным, снимите показания динамометров.

3. Повторите опыт, стараясь расположить динамометры так, чтобы угол между ними был 120°. Снимите показания динамометров.

4. Запишите результаты измерений в таблицу 8.

Таблица 8

Номер опыта	F_1, Н	F_2, Н	F_3, Н

5. Рассчитайте равнодействующую сил F_2 и F_3: $F = \sqrt{F_2^2 + F_3^2}$. Сравните полученное значение со значением F_1. Сделайте вывод.

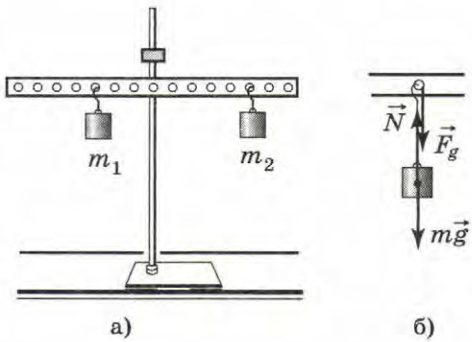
6. Нарисуйте три силы под углом 120°. Убедитесь в том, что при равновесии эти силы равны.

Проверьте второе условие равновесия.

1. Возьмите планку с отверстиями (рис. Л.6, *а*) и закрепите её на штативе.

2. С одной стороны от точки закрепления на расстоянии $l_1 = 4$ см подвесьте грузик массой m_1.

3. Подвешивайте меньший грузик массой m_2 с другой стороны на разных расстояниях l_2 до тех пор, пока планка не установится горизонтально. Запишите значения масс грузиков и расстояний от точки закрепления планки до грузиков в таблицу 9.



Л.6

4. К первому грузику на левой стороне планки подвесьте ещё один грузик массой m_3.

5. С правой стороны подвесьте ещё один грузик массой m_4 на таком расстоянии l_4, чтобы планка опять вернулась в горизонтальное положение. Запишите все значения в таблицу 9.

Таблица 9

Номер опыта	m_1, г	l_1, см	m_2, г	l_2, см	m_3, г	l_3, см	m_4, г	l_4, см

При подвешивании грузика на планку действует сила давления крючка (рис. Л.6, *б*). Эта сила давления по третьему закону Ньютона равна силе, действующей на крючок, которая, в свою очередь, равна силе тяжести, так как грузик находится в состоянии равновесия. Поэтому при расчётах можно использовать силу тяжести грузика.

По данным таблицы 9 вычислите сумму моментов сил, действующих на планку и алгебраическую сумму сил, действующих на планку.

Сделайте вывод.

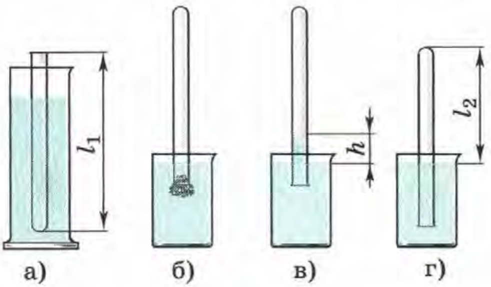
№ 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ГЕЙ-ЛЮССАКА

Цель работы: экспериментально проверить справедливость соотношения $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

Оборудование: стеклянная трубка, запаянная с одного конца, длиной 600 мм и диаметром 8—10 мм; цилиндрический сосуд высотой 600 мм и диаметром 40—50 мм, наполненный горячей водой ($t \approx 60$ °C); стакан с водой комнатной температуры; пластилин.

Указания к работе.

Чтобы проверить, выполняется ли закон Гей-Люссака, достаточно измерить объём и температуру газа в двух состояниях при постоянном давлении и проверить справедливость равенства $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Это можно осуществить, используя в качестве газа воздух при атмосферном давлении.



Л.7

Стеклянная трубка открытым концом вверх помещается вертикально на 3—5 мин в цилиндрический сосуд с горячей водой (рис. Л.7, *а*). В этом случае объём воздуха V_1 равен объёму стеклянной трубки, а температура — температуре горячей воды T_1. Это — первое состояние. Чтобы при переходе воздуха во второе состояние его количество не изменилось, открытый конец стеклянной трубки, находящейся в горячей воде, замазывают пластилином. После этого трубку вынимают из сосуда с горячей водой и замазанный конец быстро опускают в стакан с водой комнатной температуры (рис. Л.7, *б*), а затем прямо под водой снимают пластилин. По мере охлаждения воздуха в трубке вода в ней будет подниматься. После прекращения подъёма воды в трубке (рис. Л.7, *в*) объём воздуха в ней станет равным $V_2 < V_1$, а давление $p = p_{атм} - \rho g h$. Чтобы давление воздуха в трубке вновь стало равным атмосферному, необходимо увеличивать глубину погружения трубки в стакан до тех пор, пока уровни воды в трубке и стакане не выровняются (рис. Л.7, *г*). Это будет второе состояние воздуха в трубке при температуре T_2 окружающего воздуха. Отношение объёмов воздуха в трубке в первом и втором состояниях можно заменить отношением высот воздушных столбов в трубке в этих состояниях, если сечение трубки постоянно по всей длине $\left(\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}\right)$.

Поэтому в работе следует сравнить отношения $\frac{l_1}{l_2}$ и $\frac{T_1}{T_2}$. Длина воздушного столба измеряется линейкой, температура — термометром.

Порядок выполнения работы.

1. Подготовьте бланк отчёта с таблицей 10 для записи результатов измерений и вычислений (инструментальные погрешности определяются с помощью таблицы 1).

Таблица 10

Измерено					Вычислено												
l_1, мм	l_2, мм	t_1, °C	t_2, °C	$\Delta_и l$, мм	$\Delta_о l$, мм	Δl, мм	T_1, К	T_2, К	$\Delta_и T$, К	$\Delta_о T$, К	ΔT, К	$\frac{l_1}{l_2}$	ε_1, %	Δ_1	$\frac{T_1}{T_2}$	ε_2, %	Δ_2

2. Подготовьте стакан с водой комнатной температуры и сосуд с горячей водой.
3. Измерьте длину l_1 стеклянной трубки и температуру воды в цилиндрическом сосуде.
4. Приведите воздух в трубке во второе состояние так, как об этом сказано выше. Измерьте длину l_2 воздушного столба в трубке и температуру окружающего воздуха T_2.
5. Вычислите отношения $\frac{l_1}{l_2}$ и $\frac{T_1}{T_2}$, относительные (ε_1 и ε_2) и абсолютные (Δ_1 и Δ_2) погрешности измерений этих отношений по формулам

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \qquad \Delta_1 = \frac{l_1}{l_2}\varepsilon_1;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}, \qquad \Delta_2 = \frac{T_1}{T_2}\varepsilon_2.$$

6. Сравните отношения $\frac{l_1}{l_2}$ и $\frac{T_1}{T_2}$ (см. п. 3 и рис. Л.1 введения к лабораторным работам).
7. Сделайте вывод о справедливости закона Гей-Люссака.

№ 8. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Цель работы: проверить основные закономерности последовательного и параллельного соединений проводников (резисторов), а также справедливость формул для определения эквивалентного сопротивления.

Теоретическая часть.

1) При *последовательном* соединении проводников $R1$ и $R2$ сила тока, идущего по ним, одинакова:

$$I = I_1 = I_2,$$

а напряжение на концах этого участка цепи равно сумме падений напряжения на каждом из проводников:

$$U = U_1 + U_2.$$

При любом числе последовательно соединённых проводников полное сопротивление участка цепи

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots .$$

2) При *параллельном* соединении проводников напряжение на их концах одинаково:

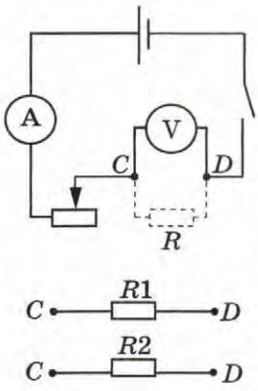
$$U = U_1 = U_2.$$

Сила тока в цепи равна сумме токов, идущих по параллельно соединённым проводникам:

$$I = I_1 + I_2.$$

При любом числе параллельно соединённых проводников эквивалентное (полное) сопротивление этого участка цепи определяется формулой

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots .$$



Л.8

Оборудование: источник тока, резисторы, амперметр, вольтметр, реостат, соединительные провода, ключ.

Порядок выполнения работы.

1. Соберите схему, состоящую из соединённых последовательно источника тока, реостата, амперметра, одного резистора (рис. Л.8).
2. Подключите к точкам C и D вольтметр параллельно резистору.
3. Замкните цепь и измерьте силу тока I_1 и напряжение U_1.
4. Замените первый резистор вторым и измерьте силу тока I_2 и напряжение U_2.
5. Подключите между точками C и D оба резистора последовательно. Параллельно им подключите вольтметр.
Измерьте силу тока I_3 и напряжение U_3.
6. Соедините резисторы параллельно, подключите их между точками C и D, затем параллельно им подключите вольтметр.
Измерьте силу тока I_4 и напряжение U_4.
7. Результаты измерений запишите в таблицу 11.

Таблица 11

I_1, А	U_1, В	I_2, А	U_2, В	I_3, А	U_3, В	I_4, А	U_4, В

8. Проведите расчёты и заполните таблицу 12.

Таблица 12

$R_1 = \frac{U_1}{I_1}$, Ом	$R_2 = \frac{U_2}{I_2}$, Ом	$R_{пос} = \frac{U_3}{I_3}$, Ом	$R_{пар} = \frac{U_4}{I_4}$, Ом	$R_{пос} = R_1 + R_2$, Ом	$R_{пар} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, Ом

Сравните значения эквивалентных сопротивлений при последовательном и параллельном соединениях резисторов. Возможное несовпадение результатов объясняется погрешностями измерений.

9. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерений.

Относительную погрешность измерения каждого сопротивления можно определить по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta U}{U_i} + \frac{\Delta I}{I_i}.$$

Абсолютная погрешность $\Delta R_i = \varepsilon_i R_i$.

Оцените, насколько ошибки измерений повлияли на совпадение результатов. Запишите окончательные результаты измерений сопротивлений для каждого случая в виде

$$R - \Delta R \leqslant R \leqslant R + \Delta R.$$

Сделайте вывод о справедливости приведённых выше формул.

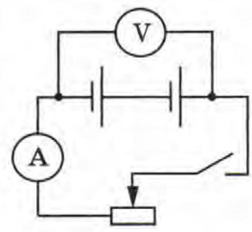
№ 9. ИЗМЕРЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: научиться измерять ЭДС источника тока и косвенными измерениями определять его внутреннее сопротивление.

Оборудование: аккумулятор или батарейка для карманного фонаря, вольтметр, амперметр, реостат, ключ.

Указания к работе.

При разомкнутом ключе (рис. Л.9) ЭДС источника тока равна напряжению на внешней цепи. В эксперименте источник тока замкнут на вольтметр, сопротивление которого $R_в$ должно быть много больше внутреннего сопротивления r источника тока. Обычно сопротивление источника тока достаточно мало, поэтому для измерения напряжения можно использовать школьный вольтметр со шкалой 0—6 В и сопротивлением $R_в = 900$ Ом (см. надпись под шкалой прибора). Так как $R_в \gg r$, отличие $\mathscr{E}$ от U не превышает десятых долей процента, а потому погрешность измерения ЭДС равна погрешности измерения напряжения. Внутреннее сопротивление источника тока можно измерить косвенным путём, сняв показания амперметра и вольтметра при замкнутом ключе. Действительно, из закона Ома для полной цепи (см. § 106) получаем $\mathscr{E} = U + Ir$, где $U = IR$ — напряжение на внешней цепи (R — сопротивление реостата). Поэтому $r_{пр} = \dfrac{\mathscr{E}_{пр} - U_{пр}}{I_{пр}}$. Для измерения силы тока в цепи можно использовать школьный амперметр со шкалой 0—2 А. Максимальные погрешности измерений внутреннего сопротивления источника тока определяются по формулам



Л.9

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta\mathscr{E} + \Delta U}{\mathscr{E}_{пр} - U_{пр}} + \frac{\Delta I}{I_{пр}}, \ \Delta r = r_{пр}\varepsilon_r.$$

Порядок выполнения работы.

1. Подготовьте бланк отчёта со схемой электрической цепи и таблицами 13 и 14 для записи результатов измерений и вычислений.

Таблица 13

<table>
<tr><th rowspan="2">Номер опыта</th><th colspan="3">Измерено</th><th colspan="2">Вычислено</th></tr>
<tr><th>$U_{пр}$, В</th><th>$I_{пр}$, А</th><th>$\mathscr{E}_{пр}$, В</th><th>$r_{пр}$, Ом</th><th>$r_{пр.\ ср}$, Ом</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td rowspan="2"></td><td></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Таблица 14

$\Delta_и U$, В	$\Delta_о U$, В	ΔU, В	ε_U, %	$\varepsilon_{\mathscr{E}}$, %	$\Delta_и I$, А	$\Delta_о I$, А	ΔI, А	ε_I, %	ε_r, %

2. Соберите электрическую цепь согласно рисунку Л.9. Проверьте надёжность электрических контактов, правильность подключения амперметра и вольтметра.

3. Проверьте работу цепи при разомкнутом и замкнутом ключе.

4. Измерьте ЭДС источника тока.

5. Снимите показания амперметра и вольтметра при замкнутом ключе для трёх положений движка реостата и вычислите $r_{пр}$. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 13.

6. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока, используя данные о классе точности приборов. Занесите все данные в таблицу 14.

7. Запишите результаты измерений ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока:

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_{пр} \pm \Delta\mathscr{E},\ \varepsilon_{\mathscr{E}} = \ldots\%;$$
$$r = r_{пр} \pm \Delta r,\ \varepsilon_r = \ldots\%.$$

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

§ 5. 1. 4 с; 16 м. **3.** 2 м/с; −12 м; 12 м. **4.** Через 1 ч, при движении навстречу; через 3 ч при движении в одну сторону, если первый автобус догоняет второй; никогда, если второй автобус едет за первым.

§ 7. 1. ≈5,3 ч. **2.** 20,8 с. **3.** ≈20,2 м/с. **4.** 90 с.

§ 12. 1. 12 м/с. **2.** −5 м; −10 м; −5 м; 10 м.

§ 14. 1. 20 м; 20 м/с. **2.** 0,12 с; ≈4,5 м/с. **3.** ≈1,4 с; ≈28 м; ≈24,5 м/с. **4.** 10 м; 40 м; ≈14 м/с; ≈15 м/с; $x = 28$ м; $y = 8$ м.

§ 17. 1. 6050 об/мин. **2.** 0,61 см/с; поворот на 90°.

§ 23. 1. Ускорение направлено в сторону действия силы, направление скорости может быть любым. **2.** 400 Н. **3.** 43 кН. **4.** 0,6 Н вверх; 0,6 Н вниз. **5.** 4 м/с^2; 56 Н.

§ 30. 1. ≈1,66 м/с^2. **2.** ≈1,39.

§ 32. 1. 225 сут. **2.** $1,19 \cdot 10^5$ Н · с. **3.** $1,6 \cdot 10^{11}$ м.

§ 35. 1. ≈14 мм. **2.** 0,5. **3.** 1,05 м. **4.** −4 м/с^2.

§ 37. 1. 8 м/с^2; 2,5 с. **2.** ≈197 Н.

§ 39. 1. 0,6 м/с. **2.** ≈0,83 м/с под углом ≈37° к берегу. **3.** Будет (рассмотрите процесс истечения газов, взяв за тело отсчёта движущуюся ракету). **4.** 0,08 м/с.

§ 42. 1. 5 Дж, 5 Дж. **2.** −40 Дж. **3.** ≈2800 Дж.

§ 47. 1. 10 Дж. **2.** ≈17 кДж. **3.** 1 м/с. **4.** 100 кВт.

§ 50. 1. 0,04 с. **2.** ≈4,2 м/с.

§ 52. 1. ≈700 Н. **2.** ≈8,7 Н · м. **3.** 1 м. **4.** 70 Н. **5.** 400 Н; 200 Н.

§ 54. 1. $\approx 1,18 \cdot 10^5$ см^2. **2.** 2 кг/кмоль; 4 кг/кмоль. **3.** В 2 раза. **4.** ≈0,056 моль. **5.** $\approx 4,65 \cdot 10^{-26}$ кг. **6.** $\approx 8,53 \cdot 10^{28}$. **7.** $5,7 \cdot 10^{-8}$ м^3. **8.** $\approx 5,8 \cdot 10^4$.

§ 58. 1. ≈6,7%. **2.** $5 \cdot 10^5$ Па. **3.** $6 \cdot 10^{-21}$ Дж. **4.** $4,9 \cdot 10^5$ м^2/с^2.

§ 62. 1. $2,76 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. **2.** $3,14 \cdot 10^4$. **3.** $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг. **4.** ≈0,5%.

§ 64. 1. 22,4 л. **2.** ≈170 кг. **3.** ≈0,15 м^3. 4. $\sqrt{3RT/M}$. **5.** Увеличивается.

§ 66. 1. 20. **2.** 250 К. **3.** ≈0,49 кг/м^3.

§ 71. 1. Будет увеличиваться. **2.** ≈0,59 кг/м^3. **3.** Да. **4.** ≈0,21 кг. **5.** 30%. **6.** Да; 1,2 г/м^3.

§ 77. 1. 2,3 г. **2.** 5 м/с. **3.** 0,5 кг. **4.** 46,5 °С. **5.** 22 °С. **6.** 10 м/с. **7.** 0 °С. **8.** 7,94 кДж. **9.** $4,48 \cdot 10^5$ Дж; $3,2 \cdot 10^5$ Дж.

§ 80. 1. $3{,}3 \cdot 10^6$ Дж; $6{,}1 \cdot 10^6$ Дж. **2.** 1780 Дж; 0,67 м. **3.** 20 кДж. **4.** $1{,}43 \cdot 10^3$ Дж. **5.** $A_{1-2} > 0$; $A_{2-3} < 0$; $A_{3-1} = 0$. **6.** $\approx 1{,}25 \cdot 10^6$ Дж. **7.** $\approx 1{,}97 \cdot 10^5$ Дж. **8.** ≈ 10 К. **9.** С воздухом. **11.** Увеличится на 64 К.

§ 83. 1. 1500 К. **2.** 20 %; 42 %. **3.** 24 %. **4.** $5 \cdot 10^7$ Дж; 42 %. **5.** ≈ 40 %.

§ 86. 1. $\approx 9{,}2 \cdot 10^{-8}$ Н. **2.** $\approx 2{,}3 \cdot 10^6$ Н. **3.** $\approx 1 \cdot 10^{-6}$ Н; $\approx 6{,}9 \cdot 10^{-7}$ Н. **4.** $\approx 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ Н; сила направлена к большему заряду. **5.** ≈ 59 г.

§ 91. 1. $\approx 1{,}5 \cdot 10^{-16}$ Кл; ≈ 940 эл. **2.** $E = \frac{9}{r^2}$ при $r < R_1$ и $r > R_2$; $E = \frac{4{,}5}{r^2}$ при $R_1 < r < R_2$. **3.** ≈ 10 Н/Кл.

§ 96. 1. $A > 0$ на AB, $A < 0$ на CD, $A = 0$ на AD и BC, $\Delta W_\text{п} = 0$, $A = 0$. **2.** $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж; $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж. **3.** 10^{-6} Кл. **4.** 4000 В/м. **6.** $-2{,}3 \cdot 10^3$ В. **7.** $k\frac{q}{l}\left(\frac{r^2}{l^2} - 1\right)$.

§ 99. 1. $1{,}75 \cdot 10^{-5}$ Кл. **2.** 5,5 мм. **3.** 700 В. **4.** $\frac{4\pi\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$. **5.** $\varepsilon_0 S d_0/(d - d_0)d$; $-\frac{q^2 d_0}{2\varepsilon_0 S}$.

§ 103. 1. $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ м/с. **2.** $r/2$.

§ 107. 1. $Q/2$; $2Q$. **2.** $\mathscr{E}$. **3.** 1200 А. **4.** 3,7 В; 0,2 Ом. **5.** $\approx 1{,}3$ Вт. **7.** 4,1 В; 2 Ом.

§ 116. 1. В металле меньше, чем в вакууме. **4.** ≈ 4 кВт. **5.** $1{,}94 \cdot 10^{-12}$; $1{,}94 \cdot 10^{-5}$. **6.** Мышьяк, фосфор, сурьму. **7.** p-типа. **8.** $\approx 2{,}9 \cdot 10^4$ Кл. **9.** $\approx 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл. **10.** 0,45 кг. **12.** $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ м. **13.** $\approx 1{,}3 \cdot 10^7$ м/с; $\approx 4{,}1 \cdot 10^7$ м/с.

ОТВЕТЫ К ОБРАЗЦАМ ЗАДАНИЙ ЕГЭ

№ задания	Параграфы									
	1	2	3	4	5	6	8	10	11	13
1	3	3	4	1	3	4	1	2	1	20 м
2	3	4	2	2	3	4	3	4	4	≈10,4 м/с
3	2	2	2	1	2	2	2	3	3	1 с
4	2	4	3	—	—	3	1	2	—	—
5	3	3	—	—	—	—	—	—	—	—

№ задания	Параграфы								
	14	16	20	22	23	28	30	31	32
1	А3 Б2	2	1	1	2	3	6 мм/с^2	2	$3,8 \cdot 10^8$ м
2	А1 Б4	1	2	2	1	4	$\approx 2,6 \cdot 10^{-3}$ м/с^2	1	2,3
3	—	2	4	3	—	4	≈4540 Н	4	6,84 км/с
4	—	2	4	1	—	2	—	—	2
5	—	—	3	4	—	4	—	—	≈18400 м/с

№ задания	Параграфы							
	33	34	36	37	39	40	42	44
1	3	2	3	0,2	20 кг · м/с	3	150 м	3
2	2	3	2	0,8 м/с^2; 10 м	1	3	3 м/с	4
3	—	4	4	arcsin 0,125	0,5	1	9,5 м	3
4	—	—	2	—	3/8	2	0,36 м	3
5	—	—	4	—	—	2	0,27	3

№ задания	Параграфы							
	45	47	48	51	54	55	57	60
1	3	10 м/с^2	3	1	$1,6 \cdot 10^{-9}$ м	2	4	3
2	2	1 м/с	1	4	≈1,76	1	3	4
3	3	—	А3, Б4	1	≈1,4 дм^3	—	2	2
4	—	—	—	—	—	—	3	2
5	—	—	—	—	—	—	—	—

№ задания	Параграфы								
	61	63	64	66	67	68	70	71	73	74
1	3	1	$24 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	4 л	1	4	3	Не выше 10 °C	1	3
2	4	3	3	18,75 см	3	1	3	—	4	4
3	3	1	0,25 моль	150 дм^3	3	3	1	—	2	2
4	4	2	≈20 моль	25 см^2	—	2	2	—	—	2
5	—	3	≈16 моль	300 К	—	3	2	—	—	2

№ задания	Параграфы								
	75	77	78	79	82	84	85	86	88
1	22,5 кДж	0,48 кг	2	1	3	3	3	4	1
2	3000 Дж	4	3	2	3	4	4	540 мкН	3
3	$U_2/U_1 = 2$	0,042 кг	1	3	3	2	3	0,11 мН	3
4	Уменьшилась в 8 раз	400 м/с	4	А4 Б1	4	3	1	—	—
5	A_{23}	—	3	—	2	—	4	—	—

№ задания	Параграфы									
	89	91	92	93	94	96	98	99	100	101
1	3	3	3	4	4	1	3	5000 В	4	4
2	1	25 Н/Кл	А2Б1	—	3	3	3	150 В	2	2
3	4	10 Н/Кл	—	—	3	1 мг	—	≈83,3 мкДж	4	3
4	1	—	—	—	—	153 В	—	—	—	3
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

№ задания	Параграфы								
	102	104	106	107	109	111	112	113	115
1	1	4	1	6 Ом	1	4	2	3	3
2	3	2	2	0,5 А или 1,5 А	3	4	2	1	4
3	4	2	2	4,5 Вт	—	$\approx 4{,}5 \cdot 10^{24}$	—	3	—
4	3	3	3	≈57,5 с	—	10 Ом; 20 Ом	—	—	—
5	—	2	2	20 мкДж	—	—	—	—	—

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОГЛАВЛЕНИЕ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Учебное издание

Серия «Классический курс»

Мякишев Геннадий Яковлевич
Буховцев Борис Борисович
Сотский Николай Николаевич

ФИЗИКА

10 класс

**Учебник для общеобразовательных организаций
с приложением на электронном носителе**

Базовый уровень

ЦЕНТР ЕСТЕСТВЕННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Редакция физики и химии
Зав. редакцией **В. И. Егудин**
Редактор **Г. Н. Федина**
Младший редактор **Т. И. Данилова**
Художники **М. Е. Савельева, В. С. Давыдов**
Художественный редактор **Т. В. Глушкова**
Компьютерная вёрстка и техническое редактирование **О. А. Карповой, Е. М. Завалей**
Корректор **Н. В. Бурдина**

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 10.04.14. Формат $70\times90^1/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookCSanPin. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 28,19 + 0,48 форз. Тираж 90 000 экз. Заказ № 3663.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение». 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в ОАО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

МЕХАНИКА

КИНЕМАТИКА

Движение с постоянным ускорением

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

Свободное падение

$$v_0 = 0; \quad t_п = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

$$v = gt$$

Вращательное движение

$$\omega = \frac{\varphi - \varphi_0}{t}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

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

$$a_{цс} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R$$

ДИНАМИКА

Законы Ньютона

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

III. $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{12}$

$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots$

Закон всемирного тяготения

$$F_{тяг} = G\frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$$

Закон Гука

$$F_{упр} = k|\Delta l|$$

Сила трения

$$F_{тр.ск} = \mu N$$

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

импульса

$$\vec{p} = \text{const} \ (\vec{F}_{вн}\Delta t = 0)$$

момента импульса

$$\vec{L} = \text{const} \ (M_{вн}\Delta t = 0)$$

энергии

$$W_к + W_п = \text{const}$$

СТАТИКА

Равновесие

$$\sum_i \vec{F}_i = 0$$

$$\sum_i M_i = 0$$

Центр тяжести

$$x_c = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i}$$

Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Степень	Приставка	Символ
10^{18}	экса	Э
10^{15}	пета	П
10^{12}	тера	Т
10^{9}	гига	Г
10^{6}	мега	М
10^{3}	кило	к
10^{2}	гекто	г
10	дека	да
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

МОЛЕКУЛЯРН ФИЗИ

Давление идеального газ

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}; \quad p = nkT$$

Закон Бойля—Мариотта

$$pV = \text{const} \ (T = \text{const}, m = \text{c}$$

Закон Гей-Люссака

$$\frac{V}{T} = \text{const} \ (p = \text{const}, m = \text{c}$$

Закон Шарля

$$\frac{p}{T} = \text{const} \ (V = \text{const}, m =$$

Уравнение Менделеева—Клапейро

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ТЕРМОДИНАМИКА

Внутренняя энергия одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT$$

Первый закон термодинамики

$$Q = \Delta U + A'$$

Изобарный процесс

$$Q = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T + p\Delta V$$

Изохорный процесс

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T$$

Изотермический процесс

$$Q = A'$$

Адиабатный процесс

$$0 = \Delta U + A'$$

КПД тепловой машины

$$\eta = \frac{A'}{Q_1}\cdot 100\ \%$$

КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}\cdot 100\ \%$$

Физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
Гравитационная постоянная	G	$6{,}672\cdot 10^{-11}$ м^3/(кг · с^2)
Масса покоя электрона	m_e	$9{,}110\cdot 10^{-31}$ кг
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}022\cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = R/N_A$	$1{,}381\cdot 10^{-23}$ Дж · К$^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = N_A e$	$9{,}65\cdot 10^4$ Кл · моль$^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8{,}314$ Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}854\cdot 10^{-12}$ Ф · м$^{-1}$
Элементарный заряд (заряд электрона)	m, q_e	$1{,}602\cdot 10^{-19}$ Кл

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИК

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Закон Кулона

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}$$

Напряжённость поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

точечного заряда

$$E = k\frac{q}{\varepsilon r^2}$$

Разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}$$

Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}\quad (\varphi = 0,\ r \to \infty)$$

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Закон Ома

для однородного участка цеп

$$I = \frac{U}{R}\quad \left(R = \rho\frac{l}{S}\right)$$

для полной цепи

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$$

Эквивалентное сопротивление

при последовательном соединении

$$R = R_1 + R_2 + \ldots$$

при параллельном соединени

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots$$

Закон Джоуля—Ленца

$$Q = I^2Rt = IUt = \frac{U^2}{R}$$

Сила тока в металлах

$$I = q_e n v_{\text{н}} S$$

Закон Фарадея

$$m = \frac{1}{F}\frac{M}{n}I\Delta t = kI\Delta t$$