

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**РАНОК**

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v^2 \quad \vec{F}_{\text{упр}} = -k\vec{x}$$



Интернет-  
поддержка

# Ф ИЗИКА

## 10 УРОВЕНЬ СТАНДАРТА

ПО УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ  
АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА  
ПОД РУКОВОДСТВОМ ЛОКТЕВА В. М.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

КЛАСС

ПОД РЕДАКЦИЕЙ В. Г. БАРЬЯХТАРА, С. А. ДОВГОГО

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$



$$E = mc^2$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

$$= \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$

УДК [37.016:53](075.3)  
Ф50

Учебник создан авторским коллективом в составе:  
В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина

**Рекомендовано Министерством образования и науки Украины**  
(приказ Министерства образования и науки Украины от 31.05.2018 № 551)

Издано за счет государственных средств. Продажа запрещена

Рецензенты:

*И. М. Гельфгат*, учитель физики коммунального учреждения  
«Харьковский физико-математический лицей № 27», учитель-методист,  
Заслуженный учитель Украины, кандидат физико-математических наук;  
*А. Б. Трофимчук*, заведующий кабинетом физико-математических предметов  
Ривненского областного института последипломного педагогического образования

Авторы и издательство выражают искреннюю благодарность:  
*Н. М. Кирюхину*, президенту Союза научных и инженерных объединений Украины,  
кандидату физико-математических наук,  
за ценные замечания и конструктивные советы;

*И. С. Чернецкому*, заведующему отделом создания учебно-тематических систем знаний  
Национального центра «Малая академия наук Украины», кандидату педагогических  
наук, за создание видеороликов демонстрационных и фронтальных экспериментов

*Методический аппарат учебника успешно прошел экспериментальную проверку  
в Национальном центре «Малая академия наук Украины»*

Переведено по изданию: Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.) : підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / [В. Г. Бар'яхтар, С. О. Довгий, Ф. Я. Божинова, О. О. Кірюхіна] ; за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. — Харків : Вид-во «Ранок», 2018. — 272 с. : іл.

Перевод с украинского *И. А. Кожановой*  
Иллюстрации художника *Владимира Хорошенко*

**Ф50 Физика** (уровень стандарта, по учебной программе авторского коллектива под руководством Локтева В. М.) : учеб. для 10 кл. заведений общ. сред. образования с обучением на рус. яз. : [пер. с укр.] / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина] ; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков : Изд-во «Ранок», 2018. — 272 с. : ил.

ISBN 978-617-09-4724-6

УДК [37.016:53](075.3)



Интернет-поддержка  
Электронные материалы  
к учебнику размещены на сайте  
[interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)

ISBN 978-617-09-4724-6 (рус.)  
ISBN 978-617-09-4360-6 (укр.)

© Барьяхтар В. Г., Довгий С. А., Божинова Ф. Я.,  
Кирюхина Е. А., 2018  
© Хорошенко В. Д., иллюстрации, 2018  
© ООО Издательство «Ранок», 2018

## Дорогие друзья!

Вы изучаете физику уже четвертый год. Надеемся, вы сумели оценить достоинства этой удивительной науки о природе, более того — пытаетесь, используя полученные знания, осознавать и объяснять различные явления и процессы. И снова с вами ваш помощник — учебник физики. Напомним его особенности.

Все параграфы учебника завершаются рубриками: «Подводим итоги», «Контрольные вопросы», «Упражнение».



В рубрике «Подводим итоги» представлены сведения об основных понятиях и явлениях, о которых шла речь в параграфе, а значит, вы сможете еще раз обратить внимание на главное.



«Контрольные вопросы» помогут выяснить, поняли ли вы изученный материал. Если вы сможете ответить на все вопросы, то все в порядке, если же нет, снова обратитесь к тексту параграфа.



Проявить свою компетентность и применить полученные знания на практике поможет материал рубрики «Упражнение». Задания этой рубрики дифференцированы по уровням сложности — от достаточно простых, требующих только внимательности, до творческих, выполняя которые, следует проявить сообразительность и настойчивость. Номер каждого задания имеет свой цвет (в порядке повышения сложности: синий, зеленый, оранжевый, красный, фиолетовый).



Некоторые задания служат для повторения материала, который вы уже изучали в курсах естествознания, математики или на предыдущих уроках физики.



Физика — наука прежде всего экспериментальная, потому в учебнике имеются экспериментальные задания. Обязательно выполняйте экспериментальные задания и лабораторные работы — и вы будете лучше понимать физику.



Немало интересного и полезного вы узнаете благодаря интернет-поддержке. Это видеоролики, показывающие в действии тот или иной физический опыт или процесс; информация, которая поможет вам в выполнении заданий; тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой; примеры решения задач.

Материалы, предложенные в конце каждого раздела, в рубриках «Подводим итоги раздела» и «Задания для самопроверки», будут полезны при повторении изученного материала и подготовке к контрольным работам.

Рубрика «Физика в цифрах» служит мостиком, связывающим достижения техники с учебным материалом параграфов.

Для желающих больше узнать о развитии физической науки и техники в Украине и мире найдется немало интересного и полезного в рубриках «Физика и техника в Украине» и «Энциклопедическая страница».

Для тех, кто уже задумывается над выбором будущей профессии и хочет знать больше о перспективах развития рынка труда, предназначена рубрика «Профессии будущего».

*Удачи вам и интересного путешествия в мир физики!*

# ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ТЕМЫ ПРОЕКТОВ, РЕФЕРАТОВ И СООБЩЕНИЙ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## РАЗДЕЛ I

### Темы проектов

1. Изучение физических характеристик собственного тела.
2. Резонанс: его проявления и применение.
3. Ремни безопасности в транспорте.

### Темы рефератов и сообщений

1. Время и его измерение.
2. Вклад космонавтов и астронавтов в освоение космического пространства.
3. Вклад Амалии Эмми Нётер в развитие теоретической физики.
4. Особенности конструкции высокоскоростного транспорта.
5. Движение в биологических системах.
6. Сила трения в технике и природе.
7. Как «работает» парашют.
8. Зачем спортсмены «закручивают» мяч.
9. Законы физики и танцы.
10. Рычаги в живой природе.
11. Гидродинамические характеристики кровеносной системы.
12. Влияние звука и инфразвука на организмы, шумовое загрязнение.
13. Ультразвук в медицине.

### Темы экспериментальных исследований

1. Зависимость дальности полета тела от направления и значения начальной скорости его движения.
2. Создание искусственной гравитации.
3. Зависимость тормозного пути и времени торможения от массы и скорости тела.
4. «Задачи» боксерских перчаток и бинтов.
5. Аэродинамические свойства бумажных самолетиков.
6. Сложение гармонических колебаний, получение фигур Лиссажю.
7. Анализ уровня шума в школьных помещениях. Рекомендации проектировщикам.

## РАЗДЕЛ II

### Темы рефератов и сообщений

1. Путешествие во времени в соответствии с теорией А. Эйнштейна.
2. Зачем нужны ускорители элементарных частиц.
3. Истории из жизни первого космонавта независимой Украины Л. К. Каденюка.
4. Пригодные для жизни планеты. Как к ним добраться?
5. Темная энергия и темная материя.
6. Вселенная как результат Большого взрыва.

## РАЗДЕЛ III

### Темы проектов

1. Диффузия и ее значение.
2. Глобальное потепление: есть ли угроза?
3. Влажность и температура воздуха в помещениях, способы сохранения тепла.

### Темы рефератов и сообщений

1. Адиабатный процесс в природе, технике.
2. Аномальные свойства воды.
3. «Живая» и «мертвая» вода.
4. Капиллярные явления в почве.
5. Почему появляются трещины на стенах домов. Как предотвратить их появление.
6. Физика и химия в процессах выпечки и хранения хлеба.
7. Защита двигателей от перегрева.
8. Тепловые процессы в теле человека.
9. Сравнение экономической целесообразности использования автомобилей с ДВС и электромобилей.
10. Ваши советы премьер-министру: целесообразно ли развивать альтернативную энергетику в Украине.
11. Эволюция автомобильных двигателей.

### Темы экспериментальных исследований

1. Зависимость температуры кипения от давления, наличия примесей и пр.
2. Выраживание кристаллов и изучение их физических свойств.
3. Исследование капиллярных явлений.
4. Зависимость скорости испарения воды от различных факторов.

## РАЗДЕЛ IV

### Темы проектов

1. Электростатические явления и жизнедеятельность организмов.
2. Электростатические явления вокруг нас.
3. Трибоэлектричество и его применение.

### Темы рефератов и сообщений

1. Электростатические методы лечения.
2. Электрическое поле в клетках живых существ.
3. Внимание: высокое напряжение.
4. История создания молниеотвода.
5. Заземление бытовых электроприборов.
6. Земля — огромный конденсатор.

### Темы экспериментальных исследований

1. Взаимодействие заряженных тел.
2. Изготовление электроскопа. Исследование с его помощью заряженных тел.
3. Различные способы визуализации силовых линий электрического поля.

# ВВЕДЕНИЕ



## § 1. ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ КАК НАУКИ



Еще совсем недавно люди даже мечтать не могли о возможностях, которые имеют сейчас. Достижения в таких областях, как робототехника, искусственный интеллект, нанотехнологии, 3D-печать, генетика, биотехнология, сегодня стремительно взаимодополняются. Созданные или создающиеся умные системы: дома, фабрики, фермы и даже города — помогут в решении самых разных проблем человечества. Разумеется, все это не может не влиять на формирование мировоззрения современного человека. При этом следует всегда помнить, что новые открытия — это не только прогресс, но и огромная ответственность.

В современном мире — бурном, противоречивом и одновременно взаимозависимом — важно осознание того, что мир познаваем, что случайности не только спутывают и нарушают наши планы, но и создают новые возможности, что существуют неизменные ориентиры-инварианты, что по мере накопления знаний происходит разрушение «рамок» наших представлений. Предвидим ваш вопрос: а при чем здесь естественные науки? Надеемся, в конце 11 класса вы сами сможете на него ответить. А сейчас только отметим, что все эти выводы вытекают из истин, открытых естественными науками, ведь их закономерности и принципы носят глобальный характер и поэтому выходят за рамки собственно наук.

1

### Какие этапы прошла физика в своем развитии

История физики — это длинная история открытий, с каждым из которых углубляется понимание природы. За любым открытием стоит конкретный человек, а чаще группа людей, чьими усилиями физика как наука поднимается на новую ступень развития. Вы уже знаете немало имен людей, чья деятельность способствовала прогрессу физической науки. Попробуем систематизировать знания о естествоиспытателях и первооткрывателях неизвестного и проследим, как накапливались физические знания.

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ

С конца XIX / начала XX в.

В общей теории относительности *А. Эйнштейн* установил связь свойств пространства-времени с энергией и импульсом материальных тел. Ученый обобщил результаты работ *И. Ньютона* в области гравитационного взаимодействия, увязав его с кривизной пространства-времени.

Фундамент квантовой механики в начале XX в. заложили *М. Планк*, *А. Эйнштейн*, *Н. Бор*, *М. Борн*.

С открытием *А. Беккерелем* радиоактивности началось развитие ядерной физики, что, в свою очередь, способствовало открытию новых источников энергии — атомной энергии и энергии ядерного синтеза. Открытия, сделанные при исследовании ядерных реакций, положили начало физике элементарных частиц.

Современные представления о Большом взрыве, черных дырах, расширении Вселенной с ускорением, о темной энергии связаны с трудами *Э. Хаббла*, *Р. Оппенгеймера*, *Х. Снайдера*, *Дж. Уилера*, *С. Хокинга* и др.

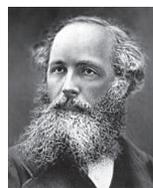


**Эрнест Резерфорд**

Установление структуры атома как системы, которая состоит из малого по размерам ядра, имеющего положительный заряд, и электронов, заряженных отрицательно. *Э. Резерфорд* считается «отцом» ядерной физики.

1871–1937

Создание теории электромагнитного поля, которая объясняла все известные на то время факты и позволяла предвидеть еще не известные явления.



**Джеймс Максвелл**

1831–1879

**Современная физика**

Идея атомарного строения материи. Экспериментально эта идея была подтверждена только в начале XX в.



**Демокрит**

**Становление физики**

ок. 460 —  
ок. 370 гг. до н. э.



**Аристотель**

Обобщение и систематизация знаний в области естественных наук. Труды *Аристотеля* до XVI в. считались «безусловной истиной». Представления философа о звуковых волнах сохранились и в современной физике.

384–322 гг. до н. э.

ок. 310 —  
ок. 230 гг. до н. э.

С древних времен до конца XVI в.

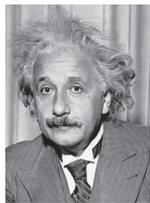
Предыстория физики — это период накопления физических знаний, появления научных представлений о свойствах окружающего мира. Огромное влияние на формирование физических понятий оказали мыслители Древней Греции: *Аристотель*, *Архимед*, *Аристарх Самосский*, *Демокрит*, *Левкипп*, *Пифагор*, *Птолемей*, *Эвклид*.

Идея гелиоцентрического (от греч. *Helios* — Солнце) строения мира. Теоретическое обоснование этой идеи появилось почти на 2000 лет позже.



**Аристарх Самосский**

## РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ



**Альберт  
Эйнштейн**

Один из основателей современной теоретической физики; по словам самого ученого, настоящая цель его исследований «всегда состояла в том, чтобы добиться упрощения теоретической физики и ее объединения в целостную систему».

1879–1955



**Нильс  
Бор**

Создание квантовой теории планетарного атома, разработка физических идей квантовой механики.

1885–1962

*Конец XVII в. — конец XIX / начало XX в.*

Период начался построением первой физической (механической) картины мира (*И. Ньютон*) и продолжился бурным развитием области физики, связанной с использованием тепловых двигателей (*Дж. Ватт, С. Карно*). Изучение электрических и магнитных явлений (*Ш. Кулон, А. Ампер, Г. Эрстед, М. Фарадей*) завершается формулированием *Дж. Максвеллом* уравнений электромагнитного поля, ставших теоретической основой для современных электротехники и радиосвязи.

1642–1727



**Исаак Ньютон**

Формулирование общих представлений о строении Вселенной и основных законов классической механики, определивших развитие физики на 300 лет вперед.

**Классическая физика**

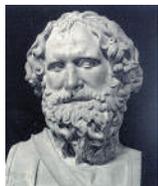
Открытие принципа относительности в механике, обоснование гелиоцентрического строения мира, создание телескопа, открытия в астрономии, изобретение термометра и др.



**Галилео  
Галилей**

1564–  
1642

287–212 гг. до н. э.



**Архимед**

Введение понятия центра тяжести, построение теории равновесия рычага, открытие законов плавания тел. Достижения ученого в инженерии лежат в основе многих современных механизмов.

**Формирование физики как науки**

*Начало XVII в. — 80-е гг. XVII в.*

Развитие физики как науки связывают с именем *Г. Галилея*, эксперименты которого заложили фундамент классической механики. В этот период был создан барометр (*Э. Торричелли*), сформулирован газовый закон (*Р. Бойль, Е. Мариотт*), открыт закон преломления света (*В. Снеллиус, Р. Декарт*), были разграничены электрические и магнитные явления (*У. Гильберт*).

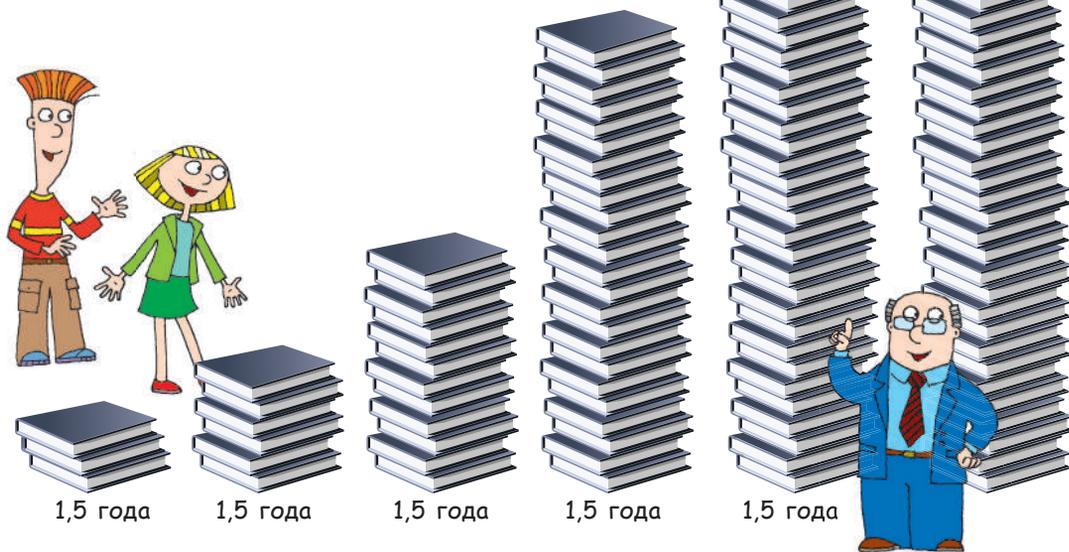
## 2 Какие вопросы волнуют современных физиков

Практически каждый день появляются новая информация и новые знания об окружающем нас мире, причем их объем настолько значителен, что зачастую они устаревают раньше, чем мы успеваем о них узнать (рис. 1.1).

Несмотря на большой объем накопленных знаний, современная физика еще очень далека от объяснения всех явлений природы. По мнению британского физика *Стивена Хокинга* (1942–2018), «прогресс состоит не в замене неверной теории на верную, а в замене одной неверной теории на другую неверную, но уточненную».

Многие десятилетия ученые пытаются создать единую теорию, объясняющую устройство Вселенной, которая объединила бы теории фундаментальных взаимодействий — сильного, слабого, электромагнитного, гравитационного. Определенные успехи уже достигнуты: в физике элементарных частиц создана *Стандартная модель* — теория, объединяющая сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия элементарных частиц.

Сегодня Стандартная модель хорошо согласуется с экспериментами, и недавнее открытие



**Рис. 1.1.** По данным исследований, объем информации непрерывно растет. В наше время он удваивается каждые полтора года. Современный человек за месяц получает столько информации, сколько человек XVII в. получал в течение жизни. Чтобы двигаться в ногу со временем, нужно постоянно заниматься самообразованием

бозона Хиггса является тому ярким подтверждением. Однако физики пытаются выйти за рамки этой модели и узнать о том, что пока объяснить не могут, например почему в мире практически отсутствуют античастицы и антиматерия. Поэтому сейчас в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) в Женеве активно проводят эксперименты по исследованию процессов, происходивших во время зарождения Вселенной. Так что ждем новых открытий!



### Контрольные вопросы

**1.** Какие этапы развития прошла физика как наука? Какие идеи развивались на каждом из этапов? **2.** На каких проблемах сосредоточена современная физика? **3.** Назовите имена известных вам ученых-физиков. В какой области физики они работали? **4.** Открытия в каких областях физики позволили создать бытовые устройства? Приведите примеры.



### Упражнение № 1

- В тексте § 1 было названо имя только одного философа Древней Греции, выдвинувшего гипотезу об атомарном строении вещества. Какие еще философы того времени высказывали такую же идею?
- Чем прославился Архимед как инженер? Какие его изобретения сейчас можно увидеть даже на детских площадках?
- Представьте, что вы SMM-менеджер образовательного заведения, и напишите убедительный пост на тему «Почему дизайнеру (или любому другому современному специалисту) необходимо изучать физику».
- Из-за неправильного использования технологий погибли и еще могут погибнуть тысячи людей, изменились и могут измениться к худшему судьбы миллионов. Приведите примеры, подтверждающие или опровергающие данный тезис. Проведите с друзьями дискуссию на тему «Может ли научно-технический прогресс привести человечество к глобальной катастрофе». Сформулируйте и запишите основные результаты обсуждения.
- Сталкивались ли вы с неправдивой информацией в Интернете? Если да, то что именно помогло вам понять, что информация не соответствует действительности? Сформулируйте свои советы по этому поводу.

### Физика и техника в Украине



**Институт теоретической физики имени Н. Н. Боголюбова НАНУ** (Киев) — ведущий научный центр по фундаментальным проблемам теоретической, математической и вычислительной физики, созданный в 1966 г. Основателем института и его первым директором был всемирно известный физик-теоретик и математик, академик *Николай Николаевич Боголюбов* (1909–1992).

Тематика научных исследований института охватывает широкий круг проблем астрофизики и космологии, физики высоких энергий, теории ядерных систем, квантовой теории молекул и кристаллов. В институте работает Научно-образовательный центр для одаренных школьников и студентов.

## § 2. МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



Чем отличается язык физики (и любой другой точной науки) от обычного? Язык физики интернационален: он создавался лучшими умами человечества, его однозначно понимают в любом уголке нашей планеты. Язык физики объективен: каждое его понятие однозначно, оно имеет один смысл, который может измениться (чаще всего — расшириться) только благодаря опытам. Как и методы научного познания, язык физики родился из практики. О методах физических исследований и некоторых физических понятиях вам напомнит материал данного параграфа.

### 1 Что такое физическое исследование и каковы его методы

Вспомним, с чего начинается исследовательская работа ученых. Прежде всего — это *наблюдение* за определенным явлением (телом или материей) и *размышления* над его сущностью.

**Наблюдение** — это восприятие природы с целью получения первичных данных для последующего анализа.

Далеко не всегда наблюдения приводят к правильным выводам. Поэтому, чтобы опровергнуть или подтвердить собственные выводы, ученые проводят *физические исследования*.

**Физическое исследование** — это целенаправленное изучение явлений и свойств природы средствами физики.

Методы физических исследований	
экспериментальный	теоретический
<p><i>Эксперимент</i> — исследование физического явления в условиях, находящихся под контролем исследователя. В своей основе физика является экспериментальной наукой: большинство ее законов основаны на фактах, установленных опытным путем.</p>	<p>Анализ данных, полученных в результате экспериментов, формулирование законов природы, объяснение конкретных явлений и свойств на основе этих законов, а главное — предвидение и теоретическое обоснование (с широким использованием математики) еще не известных явлений и свойств.</p>

**?** Какие наблюдения, теоретические и экспериментальные исследования вы провели бы, чтобы исследовать свечение обычной лампы накаливания?

Теоретические исследования проводят не с конкретным физическим телом, а с его идеализированным аналогом — **физической моделью**, которая должна учитывать только некоторые основные свойства исследуемого тела. Так, изучая движение автомобиля, мы иногда используем его физическую модель — *материальную точку* (рис. 2.1, а). Эту модель используют, если размеры тела не существенны для теоретического описания, то есть в модели

«материальная точка» учитывается только масса тела, а его форма и размеры во внимание не принимаются. А вот если нужно выяснить, как на движение автомобиля влияет сопротивление воздуха, целесообразно применить уже другую физическую модель — она должна учитывать и форму, и размеры автомобиля (рис. 2.1, б), но может не учитывать, например, размещение пассажиров в салоне. Чем больше выбрано соответствующих параметров для исследования физической системы «автомобиль», тем точнее можно предвидеть «поведение» этой системы.

**?** Целесообразно ли использовать физическую модель «материальная точка», если инженеры должны рассчитать устойчивость автомобиля?

## 2 Как измерить физическую величину

Описывая, например, движение автомобиля, мы используем определенные *количественные характеристики*: скорость, ускорение, время движения, силу тяги, мощность и т. п. Из предыдущего курса физики вы знаете, что *количественную меру свойства тела, физического процесса или явления называют физической величиной*. Значение физической величины устанавливают в ходе измерений, которые, в свою очередь, бывают **прямые** и **косвенные**.

При *прямых измерениях* величину сравнивают с ее единицей (метром, секундой, килограммом, ампером и т. п.) с помощью измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах (рис. 2.2).

**?** Назовите несколько физических величин, значения которых вы находили с помощью прямых измерений. В каких единицах измеряют эти величины? какими приборами?

При *косвенных измерениях* величину вычисляют по результатам прямых измерений других величин, связанных с измеряемой величиной некоторой функциональной зависимостью. Так, чтобы найти среднюю плотность  $\rho$  тела, нужно с помощью весов измерить массу  $m$  тела, с помощью, например, мензурки измерить его объем  $V$ , а затем массу разделить на объем:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$



**Рис. 2.1.** Определяя скорость и время движения автомобиля, можно применять физическую модель «материальная точка» (а); выясняя аэродинамические свойства автомобиля, эту физическую модель применять нельзя (б)



**Рис. 2.2.** Современные приборы для прямого измерения температуры (а); массы (б); скорости движения (в)

**Основные единицы СИ**

- **килограмм** (1 кг, 1 kg)  
единица *массы*
- **метр** (1 м, 1 m)  
единица *длины*
- **секунда** (1 с, 1 s)  
единица *времени*
- **ампер** (1 А, 1 A)  
единица *силы тока*
- **моль** (1 моль, 1 mol)  
единица *количества вещества*
- **кельвин** (1 К, 1 K)  
единица *температуры*
- **кандела** (1 кд, 1 kd)  
единица *силы света*



Использовался в 1899–1960 гг.

**1 метр** Длина 1/10 000 000 части четверти меридиана Земли, проходящего через Париж (Франция)

Специальный отрезок, калиброванный по длине. Длина данного отрезка определена как 1 метр

1 метр равен пути, который проходит свет в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 секунды

**1 килограмм** Масса 1 литра чистой воды при температуре 4 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

Платиново-иридиевый цилиндр, диаметр и высота которого равны 39 мм. Масса данного образца определена как 1 килограмм

Пока остается платиново-иридиевый цилиндр; планируют связать 1 килограмм с постоянной Планка или с числом Авогадро

Создан в 1899 г.



**3 Построение системы единиц**

В конце XVIII в., после Великой французской революции, перед французскими учеными была поставлена задача создать систему единиц на научной основе. В результате появилась *метрическая система единиц*. В 1960 г. была создана **Международная система единиц СИ**, которая со временем стала в мире доминирующей.

Исторически единицы физических величин связывали с определенными телами или природными процессами. Так, 1 метр был связан с размерами планеты Земля, 1 килограмм — с определенным объемом воды, 1 секунда — с суточным вращением Земли. Позже для каждой единицы был создан **эталон** — *средство (или комплекс средств) для воспроизведения и хранения единицы физической величины*. Основные эталоны хранились (и хранятся сейчас) в Международном бюро мер и весов (г. Севр, Франция).

Сейчас все большее распространение получают методы построения системы единиц, основанные на особенностях излучения и распространения электромагнитных волн, а также на фундаментальных физических константах. Рассмотрим *основные этапы создания системы единиц на примерах метра и килограмма*.

Напомним, что для удобства записи больших и малых значений физических величин используют *кратные и дольные единицы*.

**Кратные единицы** больше основных единиц в 10, 100, 1000 и более раз.

**Дольные единицы** меньше основных единиц в 10, 100, 1000 и более раз.

Названия кратных и дольных единиц включают в себя специальные префиксы. Например, километр (1000 м, или  $10^3$  м) — кратная единица длины, миллиметр (0,001 м, или  $10^{-3}$  м) — дольная единица длины (см. табл. 1).

Таблица 1

Префиксы для образования названий кратных и дольных единиц

Префикс	Символ	Множитель
атто-	а	$10^{-18}$
фемто-	ф	$10^{-15}$
пико-	п	$10^{-12}$
нано-	н	$10^{-9}$
микро-	мк	$10^{-6}$
милли-	м	$10^{-3}$
санти-	с	$10^{-2}$
кило-	к	$10^3$
мега-	М	$10^6$
гига-	Г	$10^9$
тера-	Т	$10^{12}$
пета-	п	$10^{15}$
экса-	е	$10^{18}$

#### 4 Погрешности измерений

При измерении любой физической величины обычно выполняют три последовательные операции: 1) выбор, проверка и установка прибора (приборов); 2) снятие показаний прибора (приборов); 3) вычисление искомой величины по результатам измерений (при косвенных измерениях); 4) оценка погрешности.

Например, нужно измерить на местности расстояние около 5 м. Разумеется, что для этого не следует брать ученическую линейку, — удобнее воспользоваться рулеткой. Все приборы имеют определенную точность. Расстояние в 5 м, как правило, не требуется определять с точностью до миллиметра, поэтому шкала рулетки может и не содержать соответствующих делений.

А вот если для ремонта лабораторного крана необходимо определить размер шайбы, целесообразно воспользоваться штангенциркулем (см. рис. 2.3).

Однако даже с помощью сверхточного прибора нельзя выполнить измерения абсолютно точно. Всегда есть погрешности измерений — отклонение значения измеренной величины от ее истинного значения.

Модуль разности между измеренным ( $x_{\text{изм}}$ ) и истинным ( $x$ ) значениями измеряемой величины называют абсолютной погрешностью измерения  $\Delta x$ :

$$\Delta x = |x_{\text{изм}} - x|$$

Отношение абсолютной погрешности к измеренному значению измеряемой величины называют относительной погрешностью измерения  $\varepsilon_x$ :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}}, \text{ или в процентах: } \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100\%$$



Рис. 2.3. Штангенциркуль. Точность измерения изображенным прибором — сотые доли миллиметра

Погрешности при измерениях бывают **случайные** и **систематические**.

Случайные погрешности	Систематические погрешности
<p><i>Случайные погрешности связаны с процессом измерения:</i> измеряя расстояние рулеткой, невозможно проложить ее идеально ровно; отсчитывая секундомером время, прибор невозможно мгновенно включить и выключить и т. д. Чтобы результаты были более точными, измерения проводят несколько раз и определяют <i>среднее значение измеряемой величины:</i></p> $x_{\text{изм}} = x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N},$ <p>где <math>x_1, x_2, \dots, x_N</math> — результаты каждого из <math>N</math> измерений.</p> <p>В данном случае <i>случайную абсолютную погрешность</i> <math>\Delta x_{\text{сл}}</math> можно определить по формуле:</p> $\Delta x_{\text{сл}} = \frac{ x_1 - x_{\text{изм}}  +  x_2 - x_{\text{изм}}  + \dots +  x_N - x_{\text{изм}} }{N}$ <p>Если измерение проводилось <i>один раз</i>, будем считать, что <i>случайная погрешность равна половине цены деления шкалы прибора.</i></p>	<p><i>Систематические погрешности связаны прежде всего с выбором прибора:</i> невозможно найти рулетку с идеально точной шкалой, идеально равноплечие рычаги и т. п. Систематические погрешности определяются классом точности прибора, поэтому их часто называют <i>погрешностями прибора.</i></p> <p>В процессе эксплуатации точность приборов может снижаться, поэтому их необходимо периодически калибровать при помощи специального оборудования.</p> <p>Абсолютные погрешности некоторых приборов, используемых в школе, приведены в <u>табл. 2</u>. Если используются другие приборы, будем считать, что <i>абсолютная погрешность прибора равна половине цены деления его шкалы.</i></p>
<p><i>Абсолютная погрешность прямого измерения</i> (<math>\Delta x</math>) учитывает как систематическую погрешность, связанную с прибором (<math>\Delta x_{\text{приб}}</math>), так и случайную погрешность (<math>\Delta x_{\text{сл}}</math>), обусловленную процессом измерения: <math>\Delta x = \Delta x_{\text{приб}} + \Delta x_{\text{сл}}</math>.</p> <p><i>Обратите внимание!</i> Приведенные формулы очень упрощены. Ученые используют более сложные методы расчетов погрешностей.</p>	

Таблица 2. Абсолютные погрешности некоторых физических приборов

Физический прибор	Цена деления шкалы прибора	Абсолютная погрешность прибора
Линейка ученическая	1 мм	±1 мм
Лента измерительная	0,5 см	±0,5 см
Штангенциркуль	0,1 мм	±0,05 мм
Цилиндр измерительный	1 мл	±1 мл
Секундомер	0,2 с	±1 с за 30 мин
Динамометр учебный	0,1 Н	±0,05 Н
Термометр лабораторный	1 °С	±1 °С

### 5 Как определить погрешности косвенных измерений

Многие физические величины невозможно измерить непосредственно. Их косвенное измерение включает два этапа: 1) методом прямых измерений находят значения определенных величин, например  $x, y$ ; 2) по соответствующей

формуле вычисляют искомую величину  $f$ . Как в таком случае определить абсолютную  $\Delta f$  и относительную  $\varepsilon_f$  погрешности?

- Относительную погрешность определяют по специальным формулам (см. табл. 3).
- Абсолютную погрешность определяют по относительной погрешности:

$$\Delta f = \varepsilon_f \cdot f_{\text{изм}}$$

- Если эксперимент проводят, чтобы выяснить, выполняется ли некое равенство (например,  $X = Y$ ), то относительную погрешность экспериментальной проверки равенства  $X = Y$  можно оценить по формуле:

$$\varepsilon = \left| \frac{X}{Y} - 1 \right| \cdot 100\%$$

### 6 Как правильно записать результаты

Абсолютная погрешность эксперимента определяет точность, с которой имеет смысл вычислять измеряемую величину.

Абсолютную погрешность  $\Delta x$  обычно округляют до одной значащей цифры с завышением, а результат измерения  $x_{\text{изм}}$  — до величины разряда, оставшегося после округления в абсолютной погрешности. Окончательный результат  $x$  записывают в виде:

$$x = x_{\text{изм}} \pm \Delta x$$

Абсолютная погрешность — положительная величина, поэтому  $x = x_{\text{изм}} + \Delta x$  — наибольшее вероятное значение измеряемой величины, а  $x = x_{\text{изм}} - \Delta x$  — ее наименьшее вероятное значение (рис. 2.4).

*Пример.* Пусть измеряли ускорение свободного падения ( $g$ ). После обработки экспериментальных данных получили:  $g_{\text{изм}} = 9,736 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta g = 0,123 \text{ м/с}^2$ .

Абсолютную погрешность следует округлить до одной значащей цифры с завышением:  $\Delta g = 0,2 \text{ м/с}^2$ . Тогда результат измерения округляется до того же разряда, что и разряд погрешности, то есть до десятых:  $g_{\text{изм}} = 9,7 \text{ м/с}^2$ . Ответ по итогам эксперимента следует представить в виде:  $g = (9,7 \pm 0,2) \text{ м/с}^2$ . Соответственно истинное значение ускорения свободного падения находится в интервале от  $9,5 \text{ м/с}^2$  до  $9,9 \text{ м/с}^2$  (рис. 2.5).

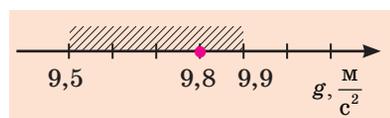


Рис. 2.5. Табличное значение:  $g_{\text{табл}} = 9,8 \text{ м/с}^2$  — принадлежит интервалу  $[9,5; 9,9] \text{ м/с}^2$ , поэтому можно сказать, что результат эксперимента ( $g_{\text{изм}} = 9,7 \text{ м/с}^2$ ) совпал с табличным в пределах погрешности измерений

Таблица 3. Некоторые формулы для определения относительной погрешности

Функциональная зависимость	Относительная погрешность
$f = x + y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = xy$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	
$f = x^n$	$\varepsilon_j = n\varepsilon_x$

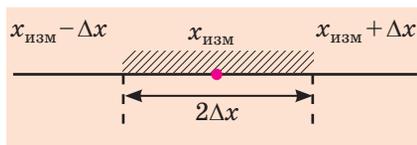


Рис. 2.4. Абсолютная погрешность измерения определяет интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины



### Подводим итоги

Физическое исследование — это целенаправленное изучение явлений и свойств природы средствами физики. Существует два метода физических исследований: теоретический и экспериментальный. В основе любого теоретического исследования лежит идеализированный объект — физическая модель.

• При любом измерении есть погрешности: случайные, связанные с процессом измерения, и систематические, связанные с выбором прибора.

• Абсолютная погрешность эксперимента определяет интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, и вычисляется по формуле:  $\Delta x = \Delta x_{\text{сл}} + \Delta x_{\text{приб}}$ . Относительная погрешность характеризует качество измерения, равна отношению абсолютной погрешности к среднему значению

измеряемой величины и выражается в процентах:  $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100\%$ .



### Контрольные вопросы

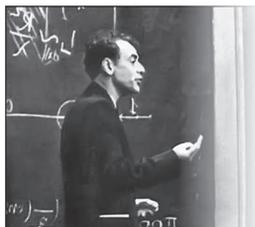
1. Назовите основные методы физических исследований. Приведите примеры.
2. Приведите примеры физических моделей. Почему физическая модель — это идеализированный объект?
3. Назовите основные единицы СИ и соответствующие им физические величины.
4. Какие виды погрешностей измерений вы знаете?
5. Чем вызвана абсолютная систематическая погрешность?
6. Что называют относительной погрешностью измерения?
7. Как правильно округлить и записать результаты измерений?



### Упражнение № 2

1. Чтобы доказать закон сохранения механической энергии, провели эксперимент. По полученным данным, средняя энергия системы тел до взаимодействия была равна 225 Дж, а после взаимодействия — 243 Дж. Оцените относительную погрешность эксперимента.
2. Определяя диаметр проволоки с помощью штангенциркуля, измерения проводили четыре раза. Были получены следующие результаты:  $d_1 = 2,2$  мм;  $d_2 = 2,1$  мм;  $d_3 = 2,0$  мм;  $d_4 = 2,0$  мм. 1) Вычислите среднее значение диаметра проволоки, случайную погрешность измерения, абсолютную и относительную погрешности измерения. 2) Округлите полученные результаты и запишите результат измерения.

## § 3. СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ



Л. Д. Ландау (1908–1968), лауреат Нобелевской премии по физике

К пониманию того, что для описания природы нужно использовать язык математики, ученые пришли давно. Собственно, некоторые разделы математики и были созданы для того, чтобы описывать природу кратким и доступным языком. Так, для определения мгновенной скорости, работы переменной силы, объема тел неправильной формы и т. д. были созданы дифференциальное и интегральное исчисления. Для более наглядного описания физических процессов научились строить графики функций, а для быстрой обработки результатов эксперимента придумали методы приближенных вычислений. Вспомним скалярные и векторные величины, без которых вам не обойтись при изучении курса физики 10 класса.

## 1 Скалярные и векторные величины

Физические величины, используемые в физике для количественной характеристики физических явлений и объектов, делятся на два больших класса: *скалярные величины* и *векторные величины*.

К *скалярным величинам*, или *скалярам* (от лат. *scalaris* — ступенчатый), относятся величины, которые определяются только значением. Например, масса тела — скалярная величина, и если мы говорим, что масса тела равна двум килограммам ( $m=2$  кг), то полностью определяем эту величину. *Сложить две скалярные физические величины означает сложить их значения, представленные в одинаковых единицах*. Понятно, что складывать можно только однородные скаляры (например, нельзя складывать массу и время, плотность и работу и т. д.).

Для определения *векторных величин* важно знать не только их значения, но и направления. **Вектор** (от лат. *vector* — носитель) — это направленный отрезок, то есть отрезок, имеющий и длину, и направление. Длину направленного отрезка называют *модулем вектора*. Обозначают векторные величины буквами греческого и латинского алфавитов, над которыми ставят стрелки, или полужирными буквами.

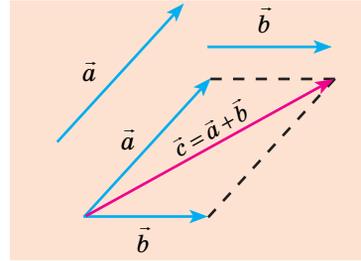
Например, скорость записывают так:  $\vec{v}$  или  $v$ ; модуль вектора скорости соответственно обозначают как  $v$ .

Правила сложения (вычитания) векторов отличаются от правил сложения (вычитания) скалярных величин.

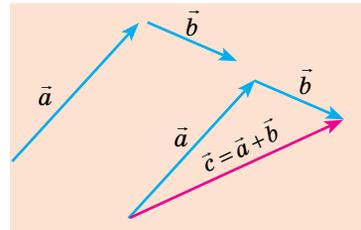
*Сумму двух векторов находят по правилу параллелограмма или по правилу треугольника (рис. 3.1, 3.2)*. Как найти сумму нескольких векторов, показано на рис. 3.3, как найти разность двух векторов, показано на рис. 3.4.

В результате умножения векторной величины  $\vec{a}$  на скалярную величину  $k$  получается вектор  $\vec{c}$  (рис. 3.5).

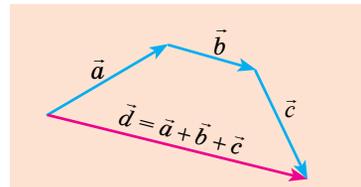
*Обратите внимание!* Единица произведения векторной и скалярной величин определяется как произведение единицы одной величины на единицу другой. Например, нужно найти перемещение самолета, который в течение 0,5 ч летит на север со скоростью 500 км/ч. Вектор перемещения:  $\vec{s} = \vec{v}t$ . Поскольку  $t > 0$ , то вектор перемещения  $\vec{s}$  будет направлен в ту же сторону, что и вектор скорости  $\vec{v}$ , а модуль вектора перемещения будет равен:  $s = vt = 500 \text{ км/ч} \cdot 0,5 \text{ ч} = 250 \text{ км}$ .



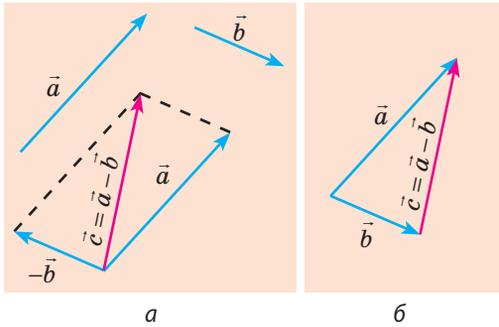
**Рис. 3.1.** Нахождение суммы двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  по правилу параллелограмма:  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$



**Рис. 3.2.** Нахождение суммы двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  по правилу треугольника:  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$



**Рис. 3.3.** Нахождение суммы трех векторов  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  и  $\vec{c}$ :  $\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$

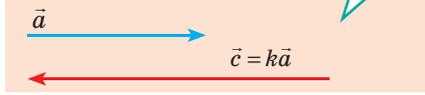


**Рис. 3.4.** Два способа нахождения разности двух векторов: *a* — к вектору  $\vec{a}$  прибавляют вектор, противоположный вектору  $\vec{b}$ , то есть:  $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{b}) \Rightarrow \vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$ ; *б* — векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  размещают так, чтобы они выходили из одной точки, вектор  $\vec{c}$ , соединяющий конец вектора  $\vec{b}$  и конец вектора  $\vec{a}$ , и есть вектор разности векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , то есть  $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$

Векторы  $\vec{c}$  и  $\vec{a}$  сонаправлены, если  $k > 0$ .



Векторы  $\vec{c}$  и  $\vec{a}$  противоположно направлены, если  $k < 0$ .



**Рис. 3.5.** Нахождение произведения вектора  $\vec{a}$  на скаляр  $k$ : модуль вектора  $\vec{c}$  равен произведению модуля скаляра и модуля вектора  $\vec{a}$ , то есть  $c = |k| a$

## 2 Как найти проекции вектора на оси координат

Осуществлять математические операции с векторами гораздо сложнее, чем со скалярами, поэтому, решая задачи, от векторных физических величин переходят к их проекциям на оси координат.

Пусть вектор  $\vec{a}$  лежит в плоскости  $XOY$  (рис. 3.6). Опустим из точки  $A$  (начало вектора  $\vec{a}$ ) и точки  $B$  (конец вектора  $\vec{a}$ ) перпендикуляры на ось  $OX$ . Основания этих перпендикуляров — точки  $A_1$  и  $B_1$  — проекции точек  $A$  и  $B$  на ось  $OX$ , а отрезок  $A_1B_1$  — проекция вектора  $\vec{a}$  на ось  $OX$ . Проекцию вектора обозначают той же буквой, что и вектор, с указанием оси в нижнем индексе, например:  $a_x$ . Если из начала и конца вектора  $\vec{a}$  провести перпендикуляры к оси  $OY$ , получим отрезок  $A_2B_2$  — проекцию вектора  $\vec{a}$  на ось  $OY$  ( $a_y$ ).

Знак проекции вектора зависит от направлений вектора и оси координат. Если от проекции начала вектора до проекции его конца нужно двигаться в направлении оси координат, то проекция вектора на эту ось считается *положительной*, а если наоборот, то проекция вектора считается *отрицательной* (см. рис. 3.6).

В общем случае проекцию вектора находят обычными геометрическими методами (рис. 3.7, *а*). На практике часто приходится иметь дело со случаями, когда вектор параллелен или перпендикулярен оси координат. Если вектор параллелен оси координат, а его направление совпадает с направлением оси, то его проекция на эту ось положительна и равна модулю вектора (рис. 3.7, *б*). Если направление вектора противоположно направлению оси координат, то его проекция на эту ось равна модулю вектора, взятому с противоположным знаком (рис. 3.7, *в*). Если же вектор перпендикулярен оси координат, то его проекция на эту ось равна нулю (рис. 3.7, *г*).

Очень важным свойством проекций является то, что проекция суммы двух векторов (рис. 3.8) или нескольких векторов на координатную ось равна алгебраической сумме проекций этих векторов на данную ось. Именно это свойство

позволяет заменять в уравнении векторные величины их проекциями — скалярными величинами и далее решать полученное уравнение обычными алгебраическими методами.



### Подводим итоги

- Физические величины бывают скалярные и векторные.
- Сложить две скалярные величины означает сложить их значения. Складывать можно скалярные величины, представленные в одинаковых единицах.
- Векторные величины имеют значение (модуль) и направление.
- Сумму векторов определяют по правилу параллелограмма или по правилу треугольника.



### Контрольные вопросы

1. Какие физические величины называют скалярными? векторными? Приведите примеры.
2. Как найти сумму векторов? разность векторов? произведение вектора и скаляра?
3. Как найти проекции вектора на оси координат?



### Упражнение № 3

1. Можно ли складывать площадь и объем? вектор импульса и энергию? вектор скорости и вектор силы? энергию и работу? Почему?
2. Перенесите в тетрадь рис. 1. Для каждого случая найдите сумму и разность двух векторов.
3. Найдите проекции векторов на оси координат (рис. 2).

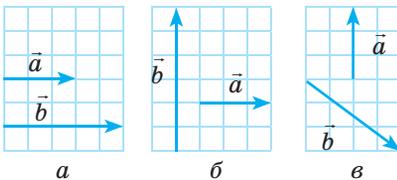


Рис. 1

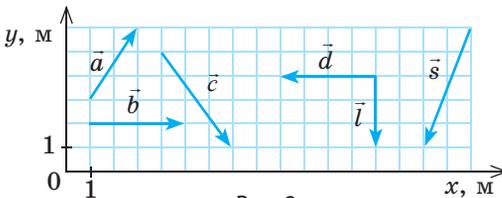


Рис. 2

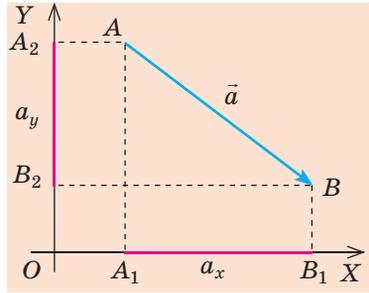


Рис. 3.6. Нахождение проекций вектора на оси координат:  $a_x$  — проекция вектора  $\vec{a}$  на ось  $OX$ ,  $a_x > 0$ ;  $a_y$  — проекция вектора  $\vec{a}$  на ось  $OY$ ,  $a_y < 0$

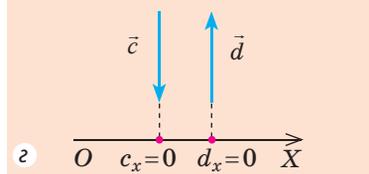
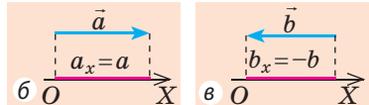
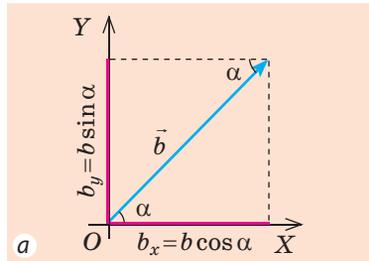


Рис. 3.7. Нахождение проекций вектора на оси координат

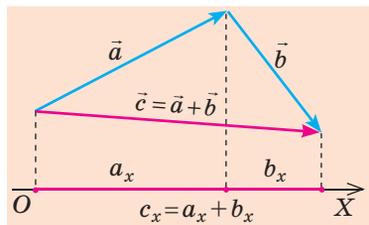


Рис. 3.8. Проекция суммы векторов равна сумме проекций складываемых векторов: если  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ , то  $c_x = a_x + b_x$

# РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА

## ЧАСТЬ 1. КИНЕМАТИКА



### § 4. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА МЕХАНИКИ. АЗБУКА КИНЕМАТИКИ

Представьте аварийную ситуацию: на одном пути оказались два поезда. Товарный поезд движется со скоростью 50 км/ч, а позади него, на расстоянии 1 км, едет экспресс со скоростью 70 км/ч. Машинист экспресса начинает тормозить. Неизбежна ли катастрофа? Сколько времени нужно экспрессу для остановки? Какой путь пройдет за это время товарный поезд? Какое наименьшее расстояние должен преодолеть экспресс до остановки? От чего это зависит? Вспомним, что на эти и многие другие подобные вопросы отвечает раздел физики, который называется «Механика».

1

#### Что изучает механика

**Механика** — наука, изучающая механическое движение тел и взаимодействия между телами.

**Основная задача механики** — познать законы механического движения и взаимодействия материальных тел, на основе этих законов предвидеть поведение тел и определять их механическое состояние (координаты и скорость движения) в любой момент времени (см., например, [рис. 4.1](#)).

Механика включает в себя несколько разделов, в частности **кинематику** — раздел механики, изучающий движение тел и при этом не рассматривающий причины, которыми это движение вызвано. Иначе говоря, кинематика не отвечает на вопросы типа: «Почему именно через 2 км остановится экспресс?», — она только описывает движение. А вот *причины изменения движения тел рассматривают в разделе механики, который называется динамика*.

2

#### Составляющие системы отсчета

**Механическое движение** — изменение со временем положения тела (или частей тела) в пространстве относительно других тел.

Тело, относительно которого рассматривают движение всех тел в данной задаче, называют *телом отсчета*. Чтобы определить положение тела в пространстве в данный момент времени, с *телом отсчета связывают систему координат*, которую задают с помощью одной, двух или трех координатных осей (соответственно одномерную, двухмерную или трехмерную систему координат), и *прибор для отсчета времени* (часы, секундомер и т. п.).



**Рис. 4.1.** На перекрестке не произошло дорожно-транспортного происшествия, поскольку все участники движения правильно решили основную задачу механики

Тело отсчета, связанное с ним система координат и прибор для отсчета времени образуют **систему отсчета** (см. рис. 4.2).

Пока не выбрана система отсчета, невозможно утверждать, движется тело или находится в состоянии покоя. Например, люди, сидящие в троллейбусе, не движутся относительно друг друга, но вместе с троллейбусом они движутся относительно полотна дороги.

? Рассмотрите рис. 4.2. Назовите тела или части тел, которые осуществляют механическое движение. Относительно каких тел вы рассматривали эти движения?

### 3 Когда размерами тела можно пренебречь

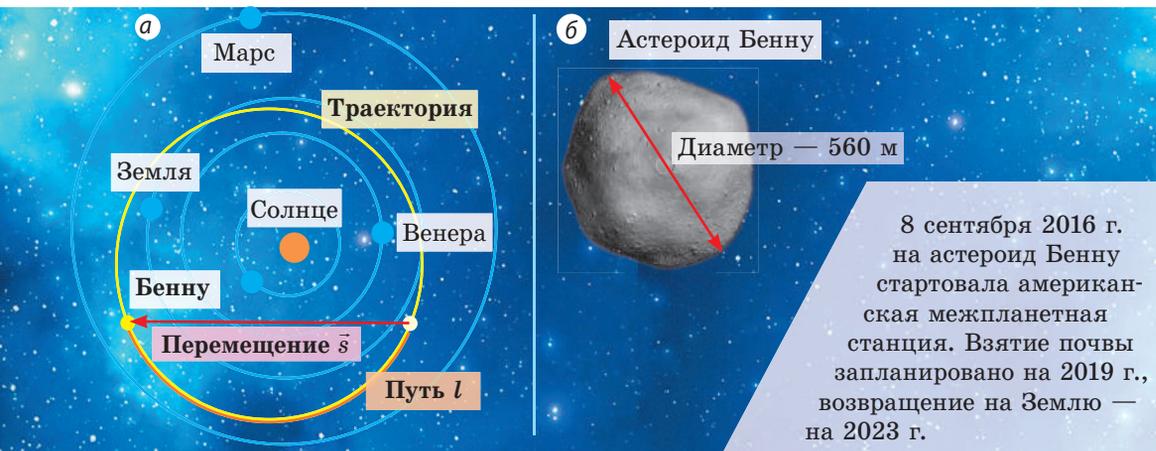
Любое физическое тело состоит из огромного количества частиц. Например, в  $1 \text{ см}^3$  воды содержится более  $3 \cdot 10^{22}$  молекул. Это во много раз больше, чем количество людей на Земле ( $7,6 \cdot 10^9$ , или 7,6 млрд, человек). А чтобы определить положение тела в пространстве, надо, строго говоря, определить положение каждой его точки. Так как же решить основную задачу механики? Из предыдущего курса физики вы знаете, что достаточно часто тело мысленно заменяют его физической моделью — *материальной точкой*. Материальная точка не имеет размеров, а ее масса равна массе тела.



Рис. 4.2. Составляющие системы отсчета: тело отсчета, система координат, прибор для отсчета времени

**Материальная точка** — это физическая модель тела, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

То же самое тело в условиях одной задачи можно считать материальной точкой, а в условиях другой — нельзя (см. рис. 4.3). Далее, если специально не оговорено, рассматривая движение тела и определяя его координаты, будем считать данное тело материальной точкой.



**Рис. 4.3.** Исследуя движение астероида Бенну по орбите, размером астероида можно пренебречь и считать его материальной точкой (а); планируя спуск на астероид робота, размерами астероида пренебрегать нельзя (б)

Воображаемая линия, в каждой точке которой последовательно находилась материальная точка во время движения, называется **траекторией движения**. Так, траектория движения астероида Бенну — эллипс (желтая линия на рис. 4.3, а).

Если определить длину участка траектории, которую описал астероид, например, за три земных месяца (оранжево-желтая линия на рис. 4.3, а), найдем путь  $l$ , который прошел астероид за это время ( $l \approx 262$  млн км). Путь — это физическая величина, равная длине траектории.

#### 4 Перемещение. Проекция перемещения

Соединим направленным отрезком (вектором) положение астероида в момент начала наблюдения и его положение в конце наблюдения (см. рис. 4.3, а). Этот вектор — перемещение астероида за данный интервал времени.

**Перемещение**  $\vec{s}$  — это векторная величина, которую графически представляют в виде направленного отрезка прямой, соединяющего начальное и конечное положения материальной точки.

Перемещение считают заданным, если известны *направление* и *модуль перемещения*. Модуль перемещения  $s$  — это длина вектора перемещения.

*Единица модуля перемещения в СИ — метр:  $[s] = 1 \text{ м (м)}^*$ .*

\* Здесь и далее в скобках приведены международные обозначения единиц СИ.

В большинстве случаев вектор перемещения не направлен вдоль траектории движения тела: путь, пройденный телом, обычно больше модуля перемещения (см. рис. 4.3, а). Путь и модуль перемещения оказываются равными, только когда тело движется вдоль прямой в неизменном направлении.

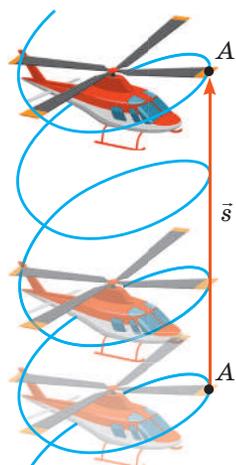
- ❓ Приведите примеры движения тел, когда:
- путь равен модулю перемещения;
  - путь больше модуля перемещения;
  - модуль перемещения равен нулю.

Если известны начальные координаты тела и его перемещение на данный момент времени, можно определить положение тела в этот момент времени, то есть *решить основную задачу механики*. Однако по формулам, записанным в векторном виде, выполнять вычисления довольно сложно, ведь приходится постоянно учитывать направления векторов. Поэтому при решении задач используют *проекции вектора перемещения на оси координат* (рис. 4.4).

### 5 В чем заключается относительность механического движения

*Траектория, путь, перемещение и скорость движения тела зависят от выбора системы отсчета — в этом заключается относительность механического движения.*

Убедитесь в относительности механического движения: рассмотрите движение точки А на лопасти винта вертолета при его вертикальном взлете, приняв, что за время наблюдения винт вертолета сделал три оборота (рис. 4.5).



*Система отсчета «Вертолет»:*

- траектория движения точки А — окружность;
- путь  $l$  — три длины окружности:  $l = 3 \cdot 2\pi R$ ;
- модуль перемещения  $s = 0$ .

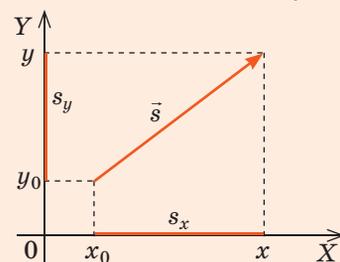
*Система отсчета «Земля»:*

- траектория движения точки А — винтовая линия;
- путь  $l$  — длина винтовой линии;
- модуль перемещения  $s$  — высота, на которую поднялся вертолет:  $s = h$ .

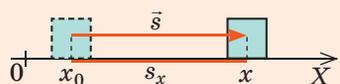
Рис. 4.5. Траектория, путь и перемещение вертолета в разных системах отсчета

- Координаты тела в любой момент времени можно определить по формулам:

$$x = x_0 + s_x; \quad y = y_0 + s_y$$



- $s_x = s$ , если направление перемещения совпадает с направлением оси координат:



- $s_x = -s$ , если направление перемещения противоположно направлению оси координат:

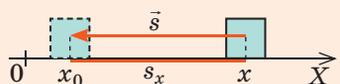


Рис. 4.4. Координатный метод определения положения тела



Нам кажется очевидным, что время не зависит от выбора системы отсчета. То есть *интервал времени между двумя событиями имеет одно и то же значение во всех системах отсчета*. Это утверждение — одна из важнейших аксиом классической механики. И это действительно так, но только тогда, когда скорость движения тела намного меньше скорости распространения света (движение именно с такими скоростями рассматривают в *классической механике*).

Если скорость движения тела сравнима со скоростью распространения света, то время для этого тела замедляется. Движение с такими скоростями рассматривают в *релятивистской механике*.

## 6 Вспоминаем виды механического движения

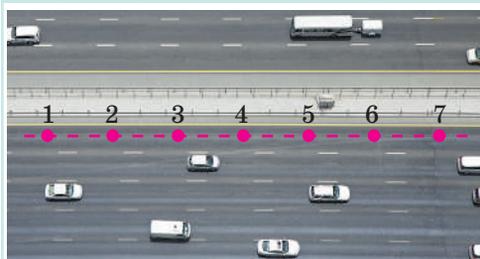
Вы знаете, что *по характеру движения различают равномерное и неравномерное движения, по форме траектории — прямолинейное и криволинейное движения*.

Внимательно рассмотрите таблицу ниже и дайте определение некоторых механических движений: равномерного прямолинейного, равномерного криволинейного, неравномерного прямолинейного, неравномерного криволинейного. Приведите собственные примеры таких движений. (Красные точки в таблице показывают положения тела через некоторые равные интервалы времени.)

**Равномерное движение** — движение, при котором материальная точка за любые равные интервалы времени проходит одинаковый путь

### Прямолинейное движение

Траектория движения — прямая



### Криволинейное движение

Траектория движения — кривая

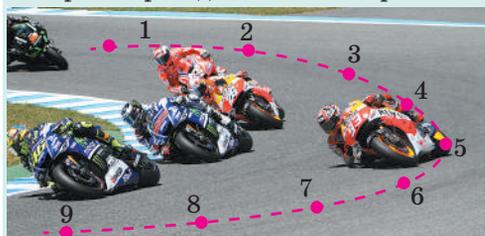


**Неравномерное движение** — движение, при котором материальная точка за равные интервалы времени проходит разный путь

**Прямолинейное движение**  
Траектория движения — прямая



**Криволинейное движение**  
Траектория движения — кривая





### Подводим итоги

- Механика — наука, изучающая механическое движение тел и взаимодействия между телами. Основная задача механики — познать законы механического движения и взаимодействия материальных тел, на основе этих законов предвидеть поведение тел и определять их механическое состояние (координаты и скорость движения) в любой момент времени.
- Механическое движение — изменение со временем положения тела (или частей тела) в пространстве относительно других тел. Решая задачу о механическом движении, обязательно нужно выбрать систему отсчета: тело отсчета, связанные с ним систему координат и прибор для отсчета времени.
- Материальная точка — это физическая модель тела, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Масса материальной точки совпадает с массой тела. Координаты материальной точки в двухмерной системе координат вычисляют по формулам:  $x = x_0 + s_x$ ;  $y = y_0 + s_y$ .
- Путь  $l$  — это физическая величина, численно равная длине траектории движения материальной точки за данный интервал времени.

Перемещение  $\vec{s}$  — это векторная величина, которую графически представляют в виде направленного отрезка прямой, соединяющего начальное и конечное положения материальной точки.

- Траектория движения, путь и перемещение тела зависят от выбора системы отсчета — в этом заключается относительность механического движения.



### Контрольные вопросы

1. Что изучает механика?
2. Какова основная задача механики?
3. Дайте определение механического движения.
4. Приведите примеры различных механических движений.
5. Назовите составляющие системы отсчета.
6. Какие виды систем координат вы знаете?
7. В каких случаях движущееся тело можно рассматривать как материальную точку? Приведите пример.
8. Опишите путь и перемещение, воспользовавшись планом характеристики физической величины (см. форзац учебника).
9. В чем заключается относительность механического движения? Приведите пример.



### Упражнение № 4

1. Какую систему координат (одномерную, двухмерную, трехмерную) вы выберете, описывая такие движения: подъем лифта; движение лодки по озеру; бег футболиста на поле; полет бабочки; спуск с горы на лыжах?
2. Назовите несколько тел отсчета, относительно которых вы сейчас движетесь. В каком направлении происходит это движение?
3. С каким телом нужно связать систему отсчета, чтобы ваши путь и перемещение в любой момент времени были равны нулю? Удобной ли будет эта система отсчета для описания вашего движения?
4. Автомобиль движется на повороте дороги, который представляет собой четверть дуги окружности радиусом 20 м. Определите путь и модуль перемещения автомобиля за время поворота.
5. Из воздушного шара, летящего горизонтально, выпал небольшой тяжелый предмет. Какова траектория движения предмета относительно шара? относительно человека, наблюдающего за движением шара, сидя на поляне?



6. Траектория движения точки на ободу колеса велосипеда относительно дороги — *циклоида* (см. [рисунок](#)). Свойства циклоиды первым исследовал Г. Галилей. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о «механических» свойствах данной линии.



### Экспериментальное задание

Воспользовавшись мобильным устройством и соответствующей программой, проложите траекторию движения от выбранного вами дома до школы. Определите путь, который будет пройден, направление и модуль перемещения.



## i

### § 5. СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ. СРЕДНЯЯ И МГНОВЕННАЯ СКОРОСТИ. ЗАКОНЫ СЛОЖЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ



Переплывали ли вы реку с быстрым течением? Трудно переплыть ее так, чтобы попасть на противоположный берег прямо напротив места начала движения. А кто-то пытался подняться по эскалатору, движущемуся вниз? Тоже сложно — лучше двигаться в направлении движения эскалатора. В обоих примерах человек участвует одновременно в двух движениях. Как при этом рассчитать скорость его движения?

#### 1

#### Вспоминаем равномерное прямолинейное движение тела

Самый простой вид механического движения — *равномерное прямолинейное движение*.

**Равномерное прямолинейное движение** — это механическое движение, при котором за любые равные интервалы времени тело совершает одинаковые перемещения.

Из определения равномерного прямолинейного движения следует:

- для описания данного движения достаточно воспользоваться одномерной системой координат, поскольку траектория движения — прямая;
- отношение перемещения  $\vec{s}$  к интервалу времени  $t$ , за который это перемещение произошло, для данного движения является неизменной величиной, ведь за равные интервалы времени тело совершает одинаковые перемещения.

Векторную физическую величину, равную отношению перемещения  $\vec{s}$  к интервалу времени  $t$ , за который это перемещение произошло, называют **скоростью равномерного прямолинейного движения тела**:

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

Направление вектора скорости движения совпадает с направлением перемещения тела, а модуль и проекцию скорости определяют по формулам:

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

Единица скорости движения в СИ — метр в секунду:

$$[v] = 1 \text{ м/с (m/s)}.$$

Из формулы для определения скорости можно найти перемещение тела за любой интервал времени:

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

Последнюю формулу будем записывать для проекций\*:  $s_x = v_x t$  — или для модулей:  $s = vt$ . Поскольку в данном случае скорость движения тела не изменяется со временем, то перемещение тела прямо пропорционально времени:

$$s \sim t; s_x \sim t.$$

Для решения основной задачи механики — определения механического состояния тела в любой момент времени — запишем уравнение координаты. Поскольку  $x = x_0 + s_x$ , а  $s_x = v_x t$ , для равномерного прямолинейного движения уравнение координаты имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t,$$

где  $x_0$  — начальная координата;  $v_x$  — проекция скорости;  $t$  — время наблюдения.

Для описания движения удобно использовать графики (рис. 5.1) — они так же полно описывают движение тел, как и формулы или словесное описание.

**?** Определите скорости движения автомобиля и велосипеда, а также их перемещения за 4 с наблюдения (рис. 5.1). На каком расстоянии друг от друга они будут через 4 с после начала наблюдения?

## 2 Какую скорость показывает спидометр

Как правило, мы имеем дело с *неравномерным движением*. Такое движение характеризуется *средней путевой скоростью, средней векторной скоростью, мгновенной скоростью* (см. таблицу на с. 28–29).

\* Здесь и далее имеются в виду проекции на ось, указанную в нижнем индексе.

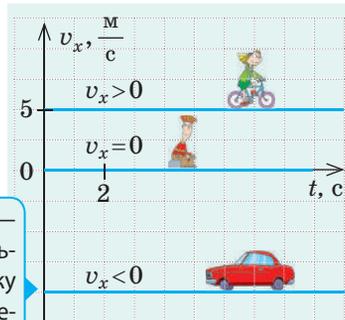
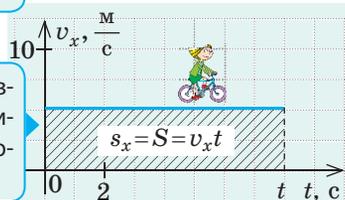


График проекции скорости — отрезок прямой, параллельной оси времени, поскольку скорость движения не изменяется со временем



Перемещение численно равно площади прямоугольника под графиком зависимости  $v_x(t)$

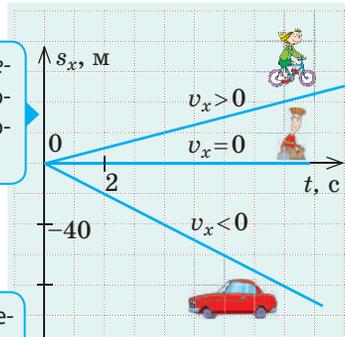


График проекции перемещения — отрезок прямой, проходящей через начало координат, поскольку  $s_x \sim t$

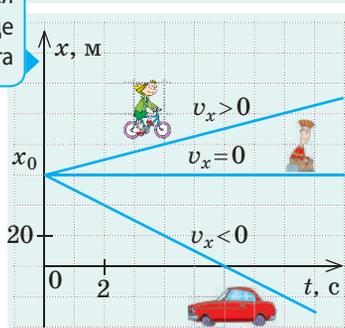
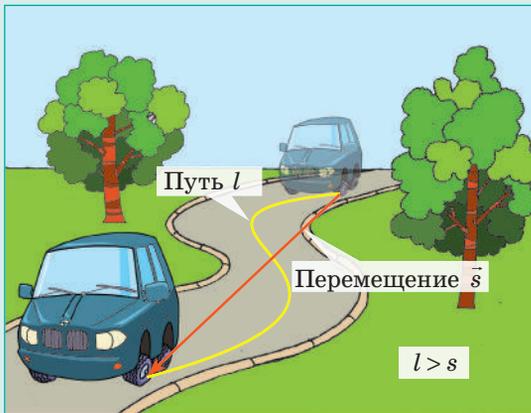


График координаты — отрезок прямой, начинающийся в точке  $(t=0; x=x_0)$ , где  $x_0$  — начальная координата

**Рис. 5.1.** Графики равномерного прямолинейного движения. Велосипед и автомобиль движутся вдоль оси  $Ox$ : велосипед — в направлении оси  $Ox$ , автомобиль — в противоположном направлении. Турист сидит на обочине

Характеристики средней путевой, средней векторной,

Средняя путевая скорость	Средняя векторная скорость
Скалярная физическая величина	Векторная физическая величина
Равна отношению всего пути $l$ к интервалу времени $t$ , за который этот путь пройден	Равна отношению перемещения $\vec{s}$ к интервалу времени $t$ , за который это перемещение совершено
$v_{\text{cp}} = \frac{l}{t} \quad \frac{\text{Весь путь}}{\text{Все время наблюдения}}$	$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\vec{s}}{t} \quad \frac{\text{Все перемещение}}{\text{Все время наблюдения}}$
Не имеет направления	Направление совпадает с направлением перемещения: $\vec{v}_{\text{cp}} \uparrow \vec{s}$



Приведем пример. Из соображений безопасности в населенных пунктах Украины установлено ограничение скорости движения транспортных средств 50 км/ч. Если водитель 10 мин мчится со скоростью 80 км/ч, а следующие 10 мин «ползет в тянучке» со скоростью 20 км/ч, средняя скорость движения автомобиля не превышает 50 км/ч, вместе с тем скоростной режим водителем был нарушен, а движение автомобиля вряд ли можно считать безопасным.

Далее, говоря о скорости движения тела, будем иметь в виду его мгновенную скорость.

При прямолинейном равномерном движении мгновенная скорость все время остается неизменной и совпадает со средней векторной скоростью движения тела. В любом другом случае мгновенная скорость движения тела изменяется: *по направлению* — при криволинейном равномерном движении; *по значению, иногда по направлению* (направление может изменяться на противоположное) — при прямолинейном неравномерном движении; *по направлению и значению одновременно* — при криволинейном неравномерном движении.

**?** Какую скорость движения показывает спидометр: среднюю векторную? среднюю путевую? мгновенную?

**3** Законы сложения перемещений и скоростей

Рассмотрим движение тела в разных *системах отсчета* (СО). Пусть таким телом будет собака, которая движется равномерно прямолинейно по плоту, плывущему по реке (рис. 5.2). Очевидно, что скорость движения плота равна скорости течения реки. За движением собаки следят наблюдатель и наблюдательница, причем наблюдательница находится на берегу (ловит

*мгновенной скорости*

**Мгновенная скорость**

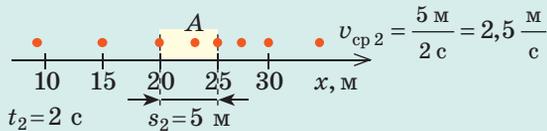
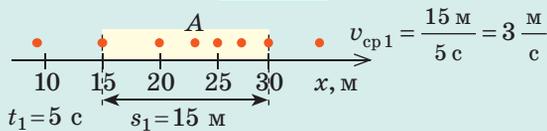
Векторная физическая величина

Скорость движения в данный момент времени, в данной точке; средняя векторная скорость, измеренная за бесконечно малый интервал времени

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} \quad \Delta \vec{s} \text{ — перемещение за очень малый интервал времени } \Delta t \ (\Delta t \rightarrow 0)$$

Направление совпадает с направлением перемещения в данный момент времени:  $\vec{v} \uparrow \uparrow \Delta \vec{s}$

Чем меньше интервал времени, за который измеряется средняя скорость движения, тем больше ее значение приближается к значению мгновенной скорости (на рисунках ниже — в точке A):



Время между последовательными положениями тела — 1 с

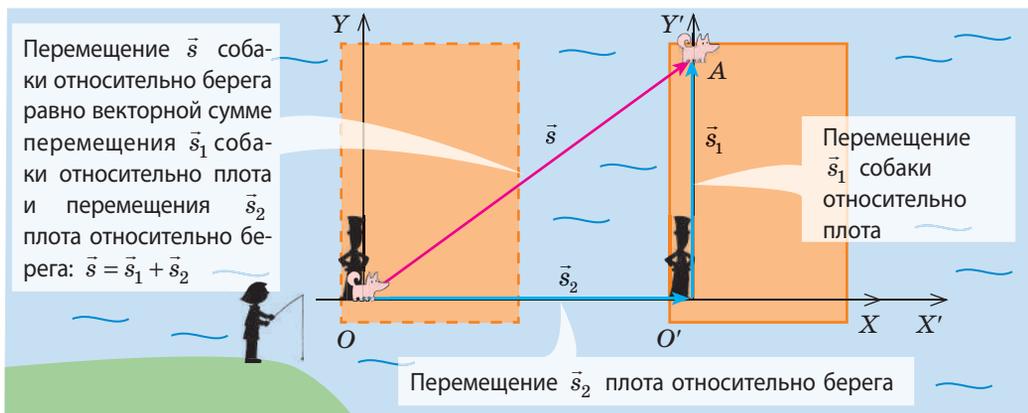
рыбу), а наблюдатель (вместе с собакой) — на плоту. Наблюдатель и наблюдательница измеряют перемещение собаки и время ее движения. Время движения собаки для обоих наблюдателей одинаково, а вот перемещения будут отличаться. Предположим, что за некоторое время  $t$  собака перебежала на другой край плота.

Перемещение  $\vec{s}_1$  собаки относительно плота (его измерил наблюдатель) приблизительно равно по модулю ширине плота и направлено перпендикулярно течению реки.

Перемещение  $\vec{s}$  собаки относительно берега (измеренное наблюдательницей) равно по модулю длине отрезка  $OA$  и направлено под некоторым углом к течению реки.

Сам плот за это время сместился по течению и совершил перемещение  $\vec{s}_2$  относительно берега.

Из рис. 5.2 видим:  $\vec{s} = \vec{s}_2 + \vec{s}_1$ . Свяжем с берегом систему координат  $XOY$  — получим неподвижную систему отсчета. С плотом свяжем систему координат  $X'O'Y'$  — получим подвижную систему отсчета.



**Рис. 5.2.** К выводу закона сложения перемещений и скоростей

Теперь можно сформулировать **закон сложения перемещений**:

Перемещение  $\vec{s}$  тела в неподвижной системе отсчета равно геометрической сумме перемещения  $\vec{s}_1$  тела в подвижной системе отсчета и перемещения  $\vec{s}_2$  подвижной системы отсчета относительно неподвижной:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

Разделив обе части уравнения на время движения  $\left(\frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}\right)$  и учитывая, что  $\frac{\vec{s}}{t} = \vec{v}$ , получим **закон сложения скоростей**:

Скорость  $\vec{v}$  движения тела в неподвижной системе отсчета равна геометрической сумме скорости  $\vec{v}_1$  движения тела в подвижной системе отсчета и скорости  $\vec{v}_2$  движения подвижной системы отсчета относительно неподвижной:

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

*Обратите внимание!* Движение и покой относительны, поэтому в нашем примере в качестве неподвижной можно было выбрать СО, связанную с плотом. В таком случае СО, связанная с берегом, была бы подвижной, а направление ее движения было бы противоположным направлению течения.

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача.** Рыбак переплывает реку на лодке, удерживая ее перпендикулярно направлению течения. Скорость  $v_1$  движения лодки относительно воды — 4 м/с, скорость  $v_2$  течения реки — 3 м/с, ширина  $l$  реки — 400 м. Определите: 1) за какое время  $t$  лодка переплывет реку и за какое время  $t_1$  лодка переплыла бы реку, если бы не было течения; 2) модуль перемещения  $s$  и модуль скорости  $v$  движения лодки относительно берега; 3) на каком расстоянии  $s_2$  вниз по течению от исходной точки лодка достигнет противоположного берега.

*Анализ физической проблемы.* В качестве неподвижной выберем СО, связанную с берегом, в качестве подвижной — СО, связанную с водой. На пояснительном рисунке изобразим векторы скорости: движения лодки относительно берега ( $\vec{v}$ ), движения лодки относительно воды ( $\vec{v}_1$ ), течения реки ( $\vec{v}_2$ ).

**Дано:**

$$\begin{aligned} v_1 &= 4 \text{ м/с} \\ v_2 &= 3 \text{ м/с} \\ l &= 400 \text{ м} \end{aligned}$$

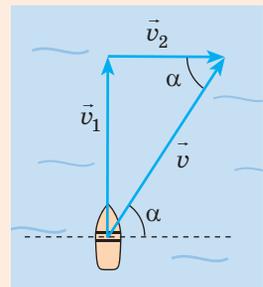
$$\begin{aligned} t &— ? \\ t_1 &— ? \\ s &— ? \\ v &— ? \\ s_2 &— ? \end{aligned}$$

**Решение**

1) В СО, связанной с водой, лодка совершила перемещение  $s_1$ , которое по модулю равно ширине реки:  $s_1 = l$ . Скорость движения лодки относительно воды  $v_1 = \frac{s_1}{t}$ . Таким образом, время движения лодки:

$$t = \frac{l}{v_1}; \quad t = \frac{400 \text{ м}}{4 \text{ м/с}} = 100 \text{ с.}$$

Видим, что время движения лодки не зависит от скорости течения реки, поэтому, если бы не было течения, лодка переплыла бы реку за то же время:  $t_1 = t = 100 \text{ с.}$



2) Модуль скорости лодки относительно берега найдем по теореме Пифагора:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}; \quad v = \sqrt{4^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} + 3^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \sqrt{25 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Лодка движется равномерно, поэтому перемещение  $s$  лодки относительно берега:

$$s = vt; \quad s = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 500 \text{ м}.$$

3) Зная время  $t$  движения лодки и скорость  $v_2$  течения реки, определим расстояние  $s_2$ , на которое лодку снесло вниз по течению:  $s_2 = v_2 t$ ;  $s_2 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 100 \text{ с} = 300 \text{ м}$ .

Ответ:  $t = t_1 = 1$  мин 40 с;  $s = 500$  м;  $v = 5$  м/с;  $s_2 = 300$  м.



### Подводим итоги

- Равномерное прямолинейное движение — это механическое движение, при котором тело за любые равные интервалы времени совершает одинаковые перемещения. При равномерном прямолинейном движении:
  - график зависимости  $v_x(t)$  — отрезок прямой, параллельной оси времени;
  - проекцию перемещения вычисляют по формуле:  $s_x = v_x t$ ; график зависимости  $s_x(t)$  — отрезок прямой, который начинается в начале координат;
  - уравнение координаты имеет вид:  $x = x_0 + v_x t$ .
- Если движение тела неравномерно, для его описания используют такие физические величины: средняя векторная скорость ( $\bar{v} = \bar{s} / t$ ); средняя путевая скорость ( $v_{\text{cp}} = l / t$ ); мгновенная скорость  $\bar{v}$  — средняя векторная скорость за бесконечно малый интервал времени:  $v = \Delta \bar{s} / \Delta t$  ( $\Delta t \rightarrow 0$ ).
- Скорость  $\bar{v}$  движения тела в неподвижной СО равна геометрической сумме скорости  $\bar{v}_1$  движения тела в подвижной СО и скорости  $\bar{v}_2$  подвижной СО относительно неподвижной СО:  $\bar{v} = \bar{v}_1 + \bar{v}_2$ .



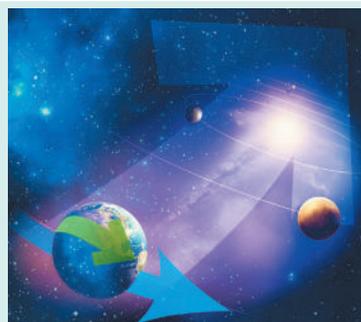
### Контрольные вопросы

1. Какое движение называют равномерным прямолинейным?
2. Дайте характеристику скорости равномерного прямолинейного движения.
3. Как определить перемещение и координату тела, движущегося равномерно прямолинейно?
4. Как выглядят графики зависимости  $v_x(t)$ ;  $s_x(t)$ ;  $x(t)$  для равномерного прямолинейного движения?
5. Дайте определение средней векторной, средней путевой, мгновенной скоростей движения.
6. Сформулируйте закон сложения перемещений и закон сложения скоростей.

### Физика в цифрах

- 1600 км/ч — скорость движения точек экватора; обусловлена вращением Земли вокруг своей оси.
- Около 110 000 км/ч — скорость движения Земли вокруг Солнца, а следовательно, и всех нас.
- Свыше 780 000 км/ч — скорость, с которой Солнечная система (а следовательно, и все мы) летит в космическом пространстве относительно центра Галактики.

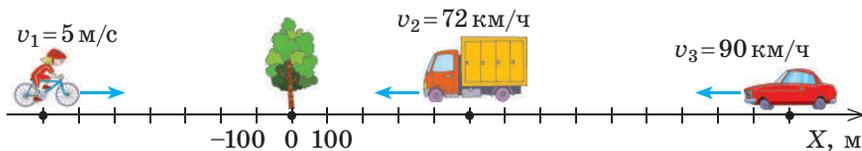
Так с какой же скоростью мы движемся? Единого ответа нет — все зависит от системы отсчета!





### Упражнение № 5

1. Моторная лодка движется со скоростью 10 м/с относительно воды. Скорость течения реки — 1 м/с. Определите скорость движения лодки относительно берега при ее движении по течению; против течения.
2. Крылатое семечко приобретает постоянную скорость падения 0,3 м/с практически сразу после начала падения с верхушки дерева. На каком расстоянии от прикорневой части ствола упадет семечко, если скорость ветра направлена горизонтально и равна 1 м/с, а высота дерева 50 м? Каково перемещение семечка относительно поверхности Земли?
3. Конь движется по арене цирка, описывая траекторию, представляющую собой половину окружности радиусом 6 м. Первую четверть окружности конь проходит за 10 с, а вторую четверть — за 20 с. Определите среднюю путевую и среднюю векторную скорости движения коня на каждом участке траектории и в течение всего времени движения.
4. Запишите уравнение движения для каждого транспортного средства на рисунке. Определите время и место встречи грузовика и велосипедистки, легкового автомобиля и велосипедистки. Где и когда легковой автомобиль обгонит грузовик? Постройте графики зависимости  $v_x(t)$  и  $x(t)$  для каждого тела.



5. Самолет должен долететь до города, расположенного в 600 км на север. С запада дует ветер со скоростью 40 км/ч. Самолет летит со скоростью 300 км/ч относительно воздуха. Каким курсом должен лететь самолет? Сколько времени будет длиться рейс?
6. Перед отправлением поезда шел дождь. Ветра не было, и капли дождя падали вертикально. Когда поезд тронулся, пассажиры заметили, что дождь стал косым, хотя погода оставалась безветренной. Объясните это явление. Определите скорость падения капель, если во время движения поезда со скоростью 40 км/ч пассажирам кажется, что капли падают под углом  $45^\circ$  к вертикали.
7. Узнайте о «рекордсменах скорости» в природе и современной технике. Подготовьте сообщение или презентацию.



### Физика и техника в Украине



**Архип Михайлович Лялька** (1908–1984) — выдающийся украинский советский конструктор авиационных двигателей, академик АН СССР. Родился в с. Саварка Киевской губернии, учился в Киевском политехническом институте.

Работая в Харьковском авиационном институте, А. М. Лялька создал конструкции первого в СССР двухконтурного турбореактивного двигателя. Первым разработал турбореактивные двигатели для сверхзвуковой авиации. Впоследствии на самолетах с двигателями конструкции А. М. Ляльки были установлены десятки мировых рекордов. Под руководством ученого создано опытно-конструкторское бюро, которое сейчас носит его имя. На аллее выдающихся ученых в Киевской политехнике установлен памятник А. М. Ляльке.

## § 6. РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ



Существуют автомобили — их называют драгстеры, — которые имеют мощность большую, чем самолет «Боинг». Представьте, какую скорость может развить такой автомобиль за короткое время? Вот показатели одного из драгстеров: за 0,5 с он развил скорость 32 м/с, за 1,0 с — 51 м/с, за 3,8 с достиг максимальной скорости — 143 м/с! Вспомним, как по этим показателям найти расстояние, которое преодолел драгстер.

### 1 Вспоминаем равноускоренное прямолинейное движение тела

Если тело движется неравномерно, скорость его движения непрерывно изменяется.

Векторную физическую величину, характеризующую быстроту изменения скорости движения тела и равную отношению изменения скорости к интервалу времени, в течение которого это изменение произошло, называют **ускорением движения тела**:

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

Из курса физики 9 класса вы знаете, что **равноускоренное прямолинейное движение** — это движение с неизменным ускорением, то есть движение, при котором скорость движения тела изменяется одинаково за любые равные интервалы времени.

Ускорение равноускоренного прямолинейного движения определяют по формуле:

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

где  $\vec{v}_0$  — начальная скорость движения тела;  $\vec{v}$  — скорость движения тела через некоторый интервал времени  $t$ .

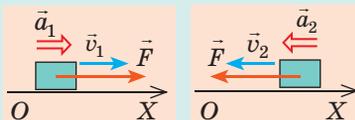
Мы будем использовать данную формулу, записанную в проекциях на ось координат, например на ось  $Ox$ :

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

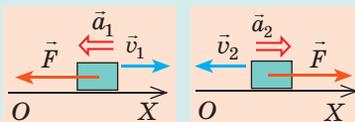
Единица ускорения в СИ — метр на секунду в квадрате:  $[a] = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \left( 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)$ .

• *Направление ускорения движения тела совпадает с направлением равнодействующей сил, действующих на тело (см. рис. 6.1).*

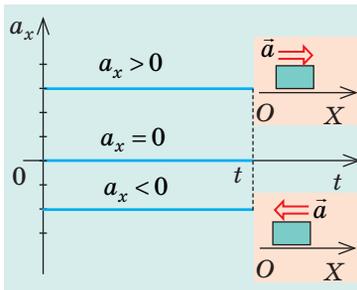
Если ускорение направлено в сторону движения тела, скорость тела увеличивается (равнодействующая  $\vec{F}$  «подталкивает» и разгоняет тело).



Если ускорение направлено противоположно движению тела, скорость тела уменьшается (равнодействующая  $\vec{F}$  «мешает» движению и замедляет его).



**Рис. 6.1.** Увеличение или уменьшение скорости движения тела не зависит от выбора направления оси  $Ox$ , а зависит от направления действия силы



**Рис. 6.2.** Графики зависимости  $a_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения

- Если ускорение равно нулю, скорость движения тела не изменяется ни по значению, ни по направлению:  $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0$ , то есть тело движется равномерно прямолинейно. Равномерное прямолинейное движение — это частный случай равноускоренного прямолинейного движения.

- При равноускоренном движении ускорение постоянно, поэтому график проекции ускорения (график зависимости  $a_x(t)$ ) — отрезок прямой, параллельной оси времени (рис. 6.2).

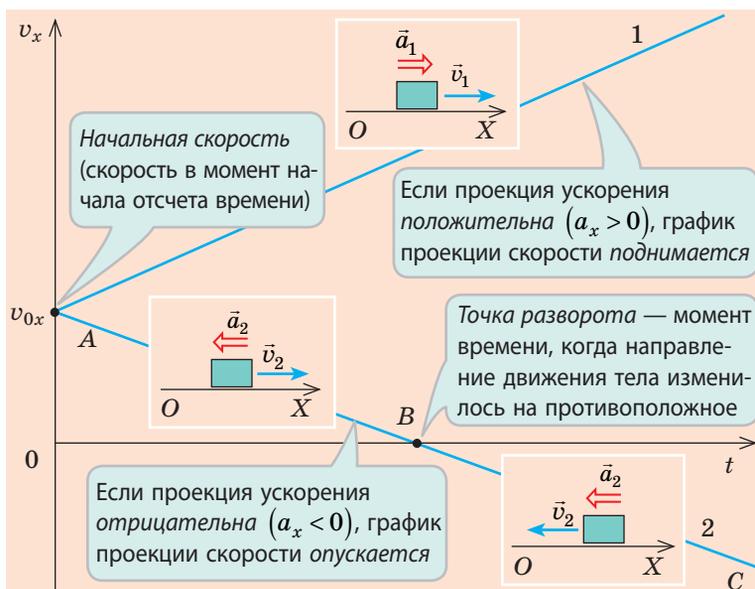
## 2 Скорость равноускоренного прямолинейного движения

Из формулы для проекции ускорения  $\left( a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} \right)$  получим уравнение проекции скорости для равноускоренного прямолинейного движения:

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

Если задано уравнение проекции скорости движения тела, то заданы и начальная скорость ( $\vec{v}_0$ ), и ускорение ( $\vec{a}$ ) движения этого тела. Например, уравнение проекции скорости имеет вид:  $v_x = -5 + 3t$ . Это означает:  $v_{0x} = -5$  м/с (начальная скорость движения равна 5 м/с, а ее направление противоположно направлению оси  $OX$ );  $a_x = 3$  м/с<sup>2</sup> (ускорение движения равно 3 м/с<sup>2</sup>, а его направление совпадает с направлением оси  $OX$ ).

Зависимость  $v_x = v_{0x} + a_x t$  является линейной, поэтому график проекции скорости — график зависимости  $v_x(t)$  — это отрезок прямой, наклоненной под некоторым углом к оси времени (рис. 6.3, 6.4).

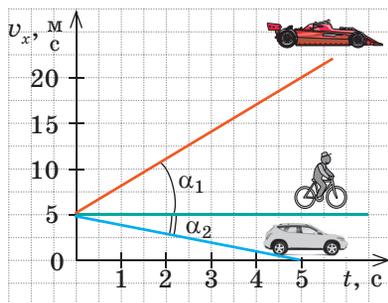


**Рис. 6.3.** Графики зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения. Тело 1 все время набирает скорость, поскольку  $\vec{a}_1 \uparrow \vec{v}_1$ . Тело 2 сначала замедляет свое движение, поскольку  $\vec{a}_2 \downarrow \vec{v}_2$  (участок  $AB$ ), затем останавливается (точка  $B$ ), после чего увеличивает скорость ( $\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$ ), двигаясь в противоположном направлении (участок  $BC$ )

Чем больше ускорение движения тела, тем больше угол  $\alpha$  наклона графика проекции скорости к оси времени (см. рис. 6.4).

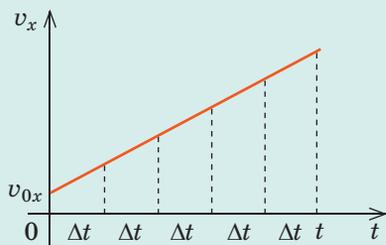
### 3 Перемещение при равноускоренном прямолинейном движении

Вы уже знаете о геометрическом смысле проекции перемещения: *перемещение тела численно равно площади фигуры под графиком зависимости проекции скорости движения тела от времени*. Мы доказывали это утверждение для равномерного движения. Рассмотрим пример равноускоренного движения:

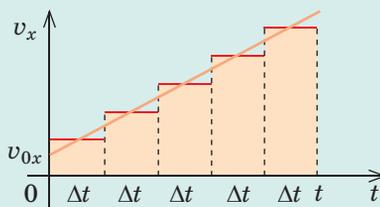


**Рис. 6.4.** Болид движется с бóльшим ускорением, чем автомобиль, поэтому  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Ускорение движения велосипедиста равно нулю

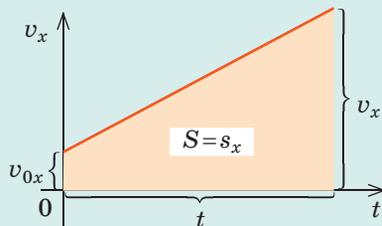
1 Разобьем все время движения тела на небольшие интервалы времени  $\Delta t$ .



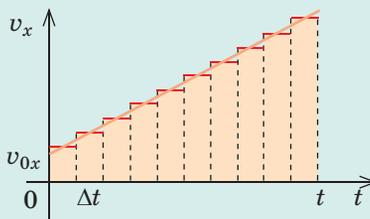
2 Предположим, что в течение каждого интервала времени скорость тела оставалась постоянной. Перемещение при таком воображаемом движении равно сумме площадей полос шириной  $\Delta t$ , образующих ступенчатую фигуру.



4 В результате бесконечного уменьшения интервалов времени ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) ступенчатая фигура «превратится» в трапецию, а перемещение будет численно равно площади этой трапеции.

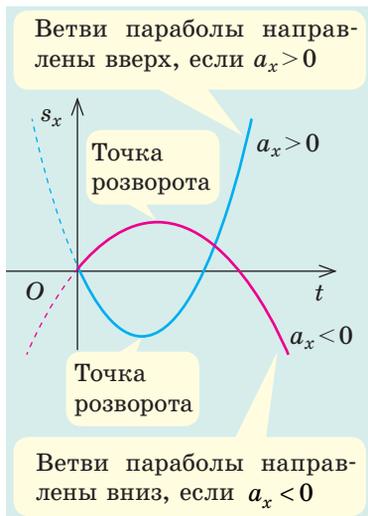


3 Если уменьшить интервалы времени  $\Delta t$ , то перемещение по-прежнему будет равно площади ступенчатой фигуры, постепенно приобретающей вид трапеции.

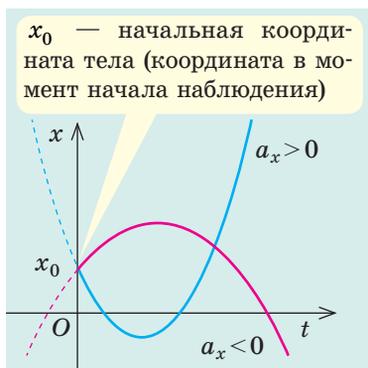


Видим, что при равноускоренном движении проекция перемещения численно равна площади трапеции под графиком зависимости  $v_x(t)$  (формулу для определения площади трапеции вы знаете из курса геометрии):

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



**Рис. 6.5.** При равноускоренном прямолинейном движении график зависимости  $s_x(t)$  — парабола, проходящая через начало координат



**Рис. 6.6.** При равноускоренном прямолинейном движении график зависимости  $x(t)$  — парабола

Приняв во внимание, что  $v_x = v_{0x} + a_x t$ , получим **уравнение зависимости проекции перемещения от времени для равноускоренного прямолинейного движения:**

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

При таком движении начальная скорость ( $\vec{v}_0$ ) и ускорение ( $\vec{a}$ ) движения тела не изменяются, поэтому зависимость проекции перемещения  $s_x$  от времени  $t$  является квадратичной, а график этой зависимости — парабола, вершина которой соответствует точке разворота (рис. 6.5).

Во многих задачах речь не идет о времени движения тела. В таких случаях для расчета неизвестных величин используют формулу:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$$

- ?** Получите последнюю формулу самостоятельно, воспользовавшись формулой  $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2}t$  и определением ускорения.

Координату тела при любом движении определяют по формуле  $x = x_0 + s_x$ , поэтому для **равноускоренного прямолинейного движения уравнение координаты** имеет вид:

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

Таким образом, зависимость  $x(t)$ , как и зависимость  $s_x(t)$ , является **квадратичной**, а график этой зависимости — **парабола** (рис. 6.6).

## ПРОФЕССИИ БУДУЩЕГО



### Диспетчер автономного транспорта

конструирует, планирует и координирует движение автономных транспортных средств, осуществляет мониторинг их движения

Часто ДТП связаны с человеческим фактором. Применение автономного транспорта (управление которым автоматизировано и осуществляется без водителя) может снизить количество аварий, уменьшить пробки, сэкономить топливо.

Знание физики поможет диспетчеру спланировать движение автотранспорта с автопилотами, выбрать лучший компьютерный алгоритм, позаботиться о безопасности движения и т. п.

**Алгоритм решения задач по кинематике**

1. Прочитайте условие задачи. Выясните, какие тела участвуют в движении, каков характер движения тел, какие параметры движения известны.

2. Запишите краткое условие задачи. При необходимости представьте значения физических величин в единицах СИ.

3. Выполните пояснительный рисунок, на котором укажите ось координат, направления скорости движения, перемещения, начальной скорости и ускорения движения тела.

4. Из формул, описывающих прямолинейное равноускоренное движение, выберите наиболее соответствующие условию задачи.

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}; v_x = v_{0x} + a_x t;$$

$$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}; s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x};$$

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

Выбранные формулы конкретизируйте для задачи.

5. Решите задачу в общем виде.

6. Проверьте единицу, найдите значение искомой величины.

7. Проанализируйте результат.

8. Запишите ответ.

**4 Учимся решать задачи**

**Задача 1.** Тормоз легкового автомобиля исправен, если на сухом асфальте при скорости 28 м/с тормозной путь автомобиля равен 49 м. Определите время торможения и ускорение движения автомобиля.

$$v_0 = 28 \text{ м/с}$$

$$s = 49 \text{ м}$$

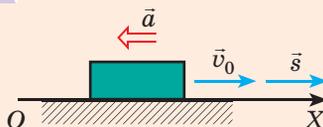
$$v = 0$$

$$t - ?$$

$$a - ?$$

*Решение*

Выполним пояснительный рисунок. Ось  $OX$  направим в направлении движения автомобиля. Автомобиль тормозит, поэтому  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$ .



Поскольку в задаче дано  $v_0$ ,  $v$  и  $s$ , то для определения времени торможения самой удобной является формула  $s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$  (1), а для определения ускорения — формула  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$  (2).

Конкретизируем данные формулы (перейдем от проекций к модулям):

- направление перемещения и направление начальной скорости совпадают с направлением оси  $OX$ , поэтому  $v_{0x} = v_0$ ,  $s_x = s$ ;
- конечная скорость равна нулю:  $v_x = 0$ ;
- направление ускорения противоположно направлению оси  $OX$ , поэтому  $a_x = -a$ .

Итак, из формулы (1):  $s = \frac{0 + v_0}{2} t = \frac{v_0}{2} t \Rightarrow t = \frac{2s}{v_0}$ ;

из формулы (2):  $s = \frac{-v_0^2}{-2a} \Rightarrow a = \frac{v_0^2}{2s}$ .

Проверим единицы, найдем значения искомых величин:

$$[t] = \frac{\text{м}}{\text{м/с}} = \text{с}, t = \frac{2 \cdot 49}{28} = 3,5 \text{ (с)};$$

$$[a] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, a = \frac{28^2}{2 \cdot 49} = 8 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

*Ответ:*  $t = 3,5 \text{ с}; a = 8 \text{ м/с}^2$ .

**Задача 2.** На рис. 1 представлен график зависимости  $v_x(t)$  для движения тела вдоль оси  $OX$ . 1) Опишите характер движения тела. 2) Запишите уравнение зависимости  $s_x(t)$ . 3) Постройте график зависимости  $s_x(t)$ .

**Решение**

1) График зависимости  $v_x(t)$  — отрезок прямой, а тело все время двигалось вдоль оси  $Ox$ , поэтому его движение равноускоренное прямолинейное. Первые 2 с скорость движения тела уменьшалась от 20 м/с до 0, затем тело развернулось и 4 с ускоряло свое движение, двигаясь в противоположном направлении.

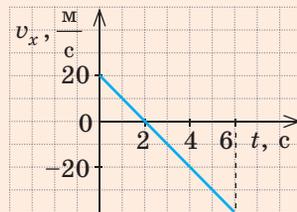


Рис. 1

2) Для равноускоренного прямолинейного движения:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2, \text{ где } v_{0x} = 20 \text{ м/с; } a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{0 - 20 \text{ м/с}}{2 \text{ с}} = -10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \text{ Таким образом, } s_x = 20t - 5t^2.$$

3) График зависимости  $s_x(t)$  — парабола, вершина которой соответствует точке разворота. Поэтому точка А с координатами  $t = 2 \text{ с}$ ,  $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 2 - 5 \cdot 2^2 = 20 \text{ м}$  — это вершина параболы. Данная парабола проходит через точку  $O$  с координатами  $(t = 0, s_x = 0)$  и симметричную ей относительно прямой  $t = 2 \text{ с}$  точку  $B$  с координатами  $(t = 4 \text{ с}, s_x = 0)$ . В конце наблюдения:  $t = 6 \text{ с}$ ,  $s_x = 20t - 5t^2 = 20 \cdot 6 - 5 \cdot 6^2 = -60 \text{ м}$  (точка  $C$ ).

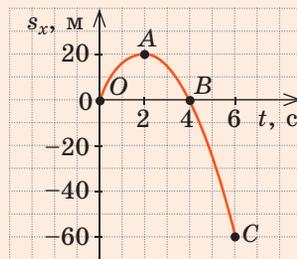


Рис. 2

По четырем точкам ( $O, A, B, C$ ) можем построить параболу (рис. 2).



**Подводим итоги**

- Равноускоренное прямолинейное движение — это движение, при котором тело движется по прямолинейной траектории с неизменным ускорением.
  - Для равноускоренного прямолинейного движения тела:
    - ускорение тела не изменяется со временем, график проекции ускорения (график зависимости  $a_x(t)$ ) — прямая, параллельная оси времени;
    - скорость движения изменяется линейно:  $v_x = v_{0x} + a_x t$ ; график зависимости  $v_x(t)$  — отрезок прямой, наклоненной к оси времени;
    - уравнение проекции перемещения:  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ ; график зависимости  $s_x(t)$  — парабола, вершина которой соответствует точке разворота;
    - координату тела определяют из уравнения  $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ ;
- график координаты — парабола.



**Контрольные вопросы**

1. Какое движение называют равноускоренным прямолинейным?
2. Охарактеризуйте ускорение как физическую величину.
3. Как движется тело, если его ускорение: а) совпадает с направлением движения? б) противоположно направлению движения? в) равно нулю?
4. Запишите уравнение зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения. Как выглядит график этой зависимости?
5. С помощью каких формул можно вычислить проекцию перемещения? Выведите эти формулы.
6. Докажите, что график зависимости  $s_x(t)$  — парабола. Как направлены ее ветви? Какому моменту движения соответствует вершина?
7. Запишите уравнение координаты для равноускоренного прямолинейного движения. Какие физические величины связывает это уравнение?



### Упражнение № 6

Движение тел считайте равноускоренным прямолинейным вдоль оси  $OX$ .

- Уравнение проекции скорости движения мотоцикла  $v_x = 20 - 4t$  (все величины заданы в единицах СИ). Определите:
  - проекцию ускорения и начальную скорость движения мотоцикла;
  - время, через которое мотоцикл остановится.
- Велосипедист, который двигался со скоростью  $2,5$  м/с, начинает разгоняться и, двигаясь с ускорением  $0,5$  м/с<sup>2</sup>, достигает скорости  $5$  м/с.
  - Каково перемещение велосипедиста за время разгона?
  - Сколько времени разгонялся велосипедист?
  - Запишите уравнения проекции скорости движения и проекции перемещения велосипедиста.
  - Какой была скорость движения велосипедиста через  $2$  с после начала разгона? Через какой интервал времени скорость его движения стала  $4$  м/с?
  - Постройте графики зависимости от времени проекции скорости и проекции перемещения велосипедиста. Покажите на графике  $v_x(t)$  перемещение велосипедиста за первые  $3$  с разгона; за последнюю  $1$  с разгона.
  - Через какое время после начала разгона велосипедист преодолет расстояние  $14$  м, если будет двигаться с неизменным ускорением?
- На рис. 1 представлен график зависимости  $v_x(t)$  для движения тела вдоль оси  $OX$ .
  - Опишите характер движения тела.
  - Запишите уравнение зависимости  $s_x(t)$ .
  - Постройте график зависимости  $s_x(t)$ .
- Определите время и координату встречи мотоциклистки и пешехода (рис. 2).
- Составьте задачу по данным, приведенным в начале § 6, и решите ее.

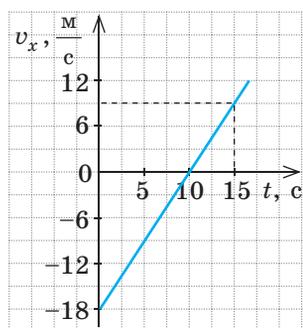


Рис. 1

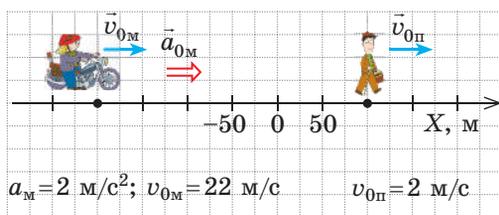


Рис. 2

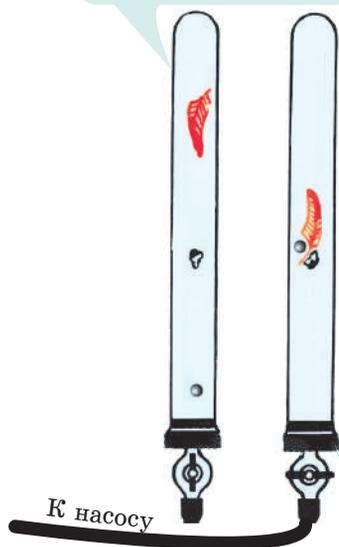


## § 7. СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ И КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ



«Человек — пушечное ядро» — цирковой номер с таким названием впервые был показан в 1877 г. в Лондоне. 16-летнюю воздушную гимнастку поместили в дуло «пушки», произвели выстрел, и девушка, пролетев над головами восхищенных зрителей, опустилась на страховочную сетку. Современные аналогичные «пушки» — это огромные пневматические пистолеты. Как они работают, предлагаем вам узнать самостоятельно, а сейчас рассмотрим, на какие законы опираются создатели подобных аттракционов.

Если трубку быстро перевернуть, первым упадет на дно стальной шарик, затем — пробка, а последним — птичье перо



Если из трубки откачать воздух, все три тела упадут на дно трубки одновременно

Рис. 7.1. Свободное падение тел в трубке Ньютона

1. С увеличением высоты  $\vec{g}$  уменьшается



3. Движению тел мешает сопротивление воздуха

Рис. 7.2. Факторы, затрудняющие описание падения тел

## 1 Вспоминаем свободное падение

Аристотель утверждал: чем тело тяжелее, тем быстрее оно падает на Землю. Однако вы знаете: так будет, если движение примерно одинаковых по размеру тел будет происходить в воздухе, а вот при отсутствии воздуха все тела — независимо от их массы, объема, формы — падают на Землю одинаково (рис. 7.1).

Падение тел в безвоздушном пространстве, то есть падение только под действием силы тяжести, называют **свободным падением**.

В случае свободного падения все тела падают на Землю с одинаковым ускорением — *ускорением свободного падения* ( $\vec{g}$ ).

- Вектор ускорения свободного падения всегда направлен вертикально вниз.

- Ускорение свободного падения впервые измерил нидерландский математик, астроном и физик *Христиан Гюйгенс* (1629–1695) в 1656 г. Вблизи поверхности Земли, то есть на небольшом (по сравнению с радиусом Земли) расстоянии, оно приблизительно равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

## 2 Свободное падение каких тел мы будем рассматривать

Характер движения тела в поле тяготения Земли достаточно сложен (рис. 7.2), и его описание выходит за рамки школьной программы. Поэтому *примем ряд упрощений*.

- Систему отсчета, связанную с точкой на поверхности Земли, будем считать инерциальной (об инерциальных СО вы вспомните в § 9).

- Будем рассматривать движение тел, находящихся вблизи поверхности Земли. Тогда кривизной поверхности Земли можно пренебречь, а *ускорение свободного падения считать неизменным*. При решении задач будем считать, что  $g = 10 \text{ м/с}^2$ , если не указано иное.

- *Сопротивлением воздуха будем пренебрегать*. Это упрощение не повлечет серьезного искажения результатов только тогда, когда *тела достаточно тяжелые, небольшие по размеру, а скорость их движения достаточно мала*. Именно такие тела будем рассматривать далее.

**?** Возьмите книгу, лист бумаги, ластик, карандаш и выясните, как сопротивление воздуха влияет на их падение.

### 3 Как движется тело, брошенное вертикально

Наблюдая за движением небольших тяжелых тел, брошенных вертикально вниз или вертикально вверх либо падающих без начальной скорости, видим, что траектория их движения — отрезок прямой. К тому же эти тела движутся с неизменным ускорением.

Движение тела, брошенного вертикально вверх или вниз, — это равноускоренное прямолинейное движение с ускорением, равным ускорению свободного падения:

$$\vec{a} = \vec{g}$$

Вспомним формулы, описывающие равноускоренное прямолинейное движение, учтем, что при описании движения тела по вертикали векторы скорости, ускорения и перемещения традиционно проецируют на ось  $OY$ , и получим ряд формул, которыми описывают свободное падение тел (см. таблицу).

**Задача 1.** С вертолета, который висит на высоте 45 м над озером, сбросили небольшой тяжелый предмет. 1) Через какой интервал времени предмет упадет в озеро? 2) Какой будет скорость движения предмета в момент касания воды? 3) Определите соотношение перемещений предмета за любые равные интервалы времени  $\Delta t$ .

*Анализ физической проблемы.* Выполним пояснительный рисунок (рис. 1). Ось  $OY$  направим вертикально вниз. Начало координат пусть совпадает с положением тела в момент начала падения. Скорость движения тела в этот момент равна нулю.

#### Формулы для расчета кинематических характеристик свободного падения

Равноускоренное движение вдоль оси $OX$	Свободное падение вдоль оси $OY$
Проекция скорости движения	
$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Проекция перемещения	
$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$s_y = h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$	$s_y = h_y = \frac{v_y + v_{0y}}{2} t$
$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	$s_y = h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$
Уравнение координаты	
$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$

Дано:  
 $v_0 = 0$   
 $s = h = 45$  м  
 $g = 10$  м/с<sup>2</sup>

$t$  — ?  
 $v$  — ?  
 $s_1 : s_2 : s_3 \dots$  — ?

*Поиск математической модели, решение*  
 Запишем уравнения проекции перемещения и проекции скорости движения тела:

$$s_y = h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}; \quad v_y = v_{0y} + g_y t.$$

Конкретизируем эти уравнения (перейдем от проекций к модулям). Из рис. 1 видно:

$$s_y = s = h; \quad g_y = g; \quad v_{0y} = 0; \quad v_y = v.$$

Итак, получим:  $h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad v = gt.$

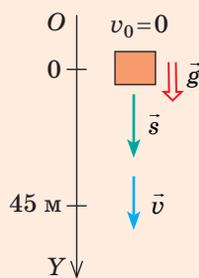


Рис. 1

Проверим единицы, найдем значения искомых величин:

$$[t] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{м}/\text{с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 45}{10}} = 3 \text{ (с)}; \quad v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 3 \text{ с} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Для ответа на вопрос 3 воспользуемся геометрическим смыслом перемещения (рис. 2). Свободное падение тел — равноускоренное прямолинейное движение, поэтому график зависимости  $v_y(t)$  — это отрезок прямой, который начинается в точке  $(t=0, v_y=0)$ . Видим, что за первый интервал времени  $\Delta t$  перемещение тела численно равно площади  $S_0$  одного треугольника (площадь фигуры под графиком):  $s_1 = 1S_0$ ; за второй интервал времени  $\Delta t$  — площади трех треугольников:  $s_2 = 3S_0$ ; за третий интервал времени  $\Delta t$  — площади пяти треугольников:  $s_3 = 5S_0$  и т. д.

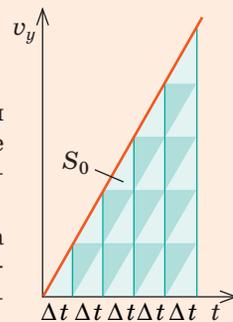


Рис. 2

Ответ:  $t = 3$  с;  $v = 30$  м/с;  $s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$

Если тело свободно падает без начальной скорости, перемещения тела за равные последовательные интервалы времени относятся как нечетные числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 \dots = 1 : 3 : 5 : 7 \dots$$

Это свойство касается любого равноускоренного движения без начальной скорости. Так, если за первую секунду тело прошло 5 м, за вторую оно пройдет  $3 \cdot 5 = 15$  м, за третью —  $5 \cdot 5 = 25$  м, за четвертую —  $7 \cdot 5 = 35$  м и т. д.

#### 4 Что падает быстрее

Представим, что с моста в горизонтальном направлении бросили каштан и в то же мгновение выпустили из руки второй каштан. Какой каштан упадет в воду быстрее? На самом деле оба каштана, если им ничего не мешает, упадут в воду одновременно.

Итак, движению тела в вертикальном направлении «не мешает» его движение в горизонтальном направлении, и наоборот. В данном случае мы имеем дело с проявлением *принципа независимости движений*, в соответствии с которым любое сложное движение можно рассматривать как сумму двух (или более) простых движений. Воспользовавшись специальным устройством и видеокамерой мобильного телефона, можем легко подтвердить это (рис. 7.3).

Толкатель сообщает шарик 2 горизонтальную скорость. В этот же момент шарик 1 высвобождается и начинает вертикальное падение

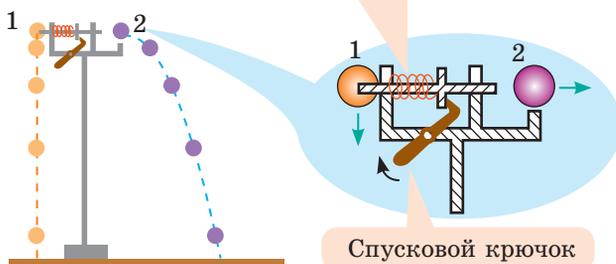


Рис. 7.3. Шарик 1, свободно падающий без начальной скорости, и шарик 2, брошенный горизонтально, все время находятся на одинаковой высоте и на пол падают одновременно

**5 Движение тел, брошенных горизонтально или под углом к горизонту**

Воспользовавшись принципом независимости движений, рассмотрим движение тела, которому вблизи поверхности Земли сообщена некоторая не вертикальная скорость. Напомним: сопротивление воздуха будем считать пренебрежимо малым, то есть движение происходит только под действием силы тяжести с ускорением  $\vec{g}$ . Такое движение удобно рассматривать как результат сложения двух независимых движений (рис. 7.4):

1) *горизонтального* — равномерного вдоль оси  $OX$  (поскольку  $g_x = 0$ ), которое описывается уравнениями:

$$v_x = v_{0x}; \quad x = x_0 + v_{0x}t;$$

2) *вертикального* — равноускоренного (с ускорением  $\vec{g}$ ) вдоль оси  $OY$ , которое описывается уравнениями:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2}t^2.$$

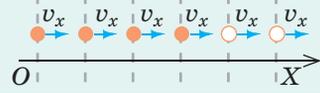
• Модуль и направление скорости движения тела в произвольной точке траектории находим, воспользовавшись теоремой Пифагора и определением тангенса (см. рис. 7.4):

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

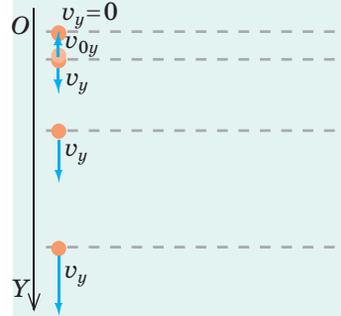
• Если из уравнения  $x = x_0 + v_{0x}t$  найти  $t$  и подставить полученное выражение в уравнение  $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y}{2}t^2$ , получим уравнение траектории движения тела, имеющее вид квадратичной функции:  $y(x) = Ax^2 + Bx + C$ .

Таким образом, траектория движения тела, которому вблизи поверхности Земли сообщена начальная скорость, является параболической (рис. 7.5).

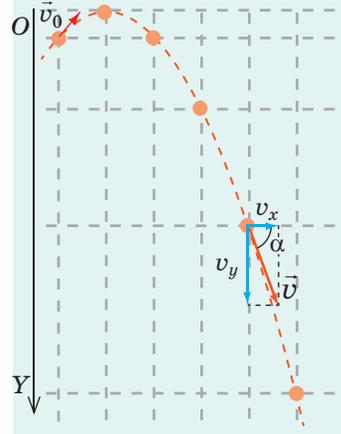
*Горизонтальное движение* — скорость движения не изменяется



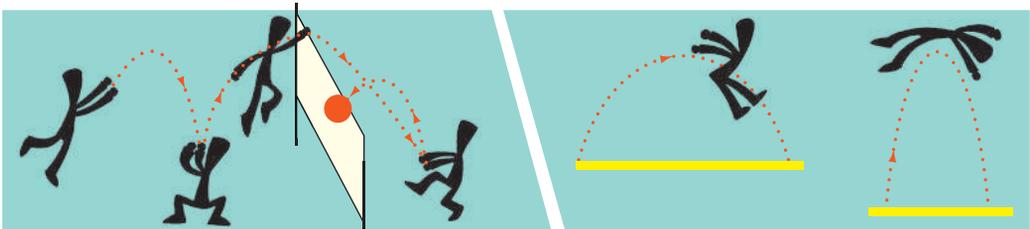
*Вертикальное движение* — равноускоренное движение с ускорением  $\vec{g}$



*Сложное движение*



**Рис. 7.4.** Сложение вертикального и горизонтального движений. Положения тела показаны через равные интервалы времени



**Рис. 7.5.** Траектория тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, является параболической, а ее кривизна зависит от модуля и направления начальной скорости

## 6 Движение тела, брошенного горизонтально

**Задача 2.** Мотоциклист, двигавшийся горизонтально по горной дороге со скоростью 15 м/с, не затормозил перед поворотом, и его мотоцикл упал в сугроб с высоты 20 м. 1) Сколько времени падал мотоцикл? 2) Какова горизонтальная дальность полета мотоцикла? Как, по вашему мнению, изменится ли эта дальность в реальной ситуации? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Дано:

$$v_0 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$h = 20 \text{ м}$$

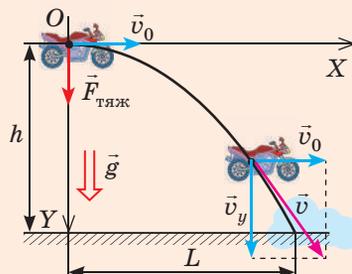
$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$t$  — ?

$L$  — ?

Решение

Выберем систему отсчета: начало координат свяжем с местом, где мотоцикл начал падение, ось  $OY$  направим вертикально вниз, ось  $OX$  — в направлении начальной скорости движения мотоцикла (см. рисунок).



В выбранной системе отсчета движение:

вдоль оси  $OX$  — равномерное:

$$v_x = v_{0x}; \quad x = x_0 + v_{0x}t, \quad (1)$$

где  $v_{0x} = v_0$ ;  $x_0 = 0$ ;  $x = L$ .

вдоль оси  $OY$  — равноускоренное:

$$v_y = v_{0y} + g_y t; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $v_{0y} = 0$ ;  $g_y = g$ ;  $y = h$ ;  $y_0 = 0$ .

Следовательно, уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$v_x = v_0; \quad L = v_0 t$$

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

*Обратите внимание!* Выделенные формулы справедливы для описания движения любого горизонтально брошенного тела.

1) Определим время падения мотоцикла:  $h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ ;  $t = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \text{ м}}{10 \text{ м/с}^2}} = 2 \text{ с}$ .

2) Вычислим дальность полета:  $L = v_0 t$ ;  $L = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2 \text{ с} = 30 \text{ м}$ .

*Проанализируем результат.* Очевидно, что в реальной ситуации дальность полета будет меньше, ведь движению мешает сопротивление воздуха. Однако это не означает, что падение будет более безопасным. *Будьте осторожны и внимательны на дорогах!*

Ответ:  $t = 2 \text{ с}$ ;  $L = 30 \text{ м}$ .

## 7 Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Прочитав о рекордах скорости спортивных снарядов, ученица решила выяснить, какую скорость она придает футбольному мячу. Для этого девочка ударила по мячу, направив его под углом  $45^\circ$  к горизонту (см. рис. 7.6). Мяч упал на землю на расстоянии 40 м от ученицы. Выполнив расчеты, девочка решила, что она придала мячу скорость 20 м/с, а мяч поднялся на высоту 8 м. Не ошиблась ли юная футболистка?



**Рис. 7.6.** По направлению и дальности полета мяча можно определить, какую скорость вы придали мячу при ударе или броске

**?** Ознакомьтесь с решением аналогичной задачи в общем виде (см. ниже). Воспользовавшись полученными формулами, оцените расчеты ученицы, а после уроков проведите соответствующий эксперимент и оцените, какую скорость придаете мячу вы.

**Задача 3.** Футболистка ударила по мячу, сообщив ему скорость  $v_0$ , направленную под углом  $\alpha$  к горизонту. Определите дальность полета и максимальную высоту подъема мяча.

**Дано:**

$v_0$   
 $\alpha$   
 $g$

$L$  — ?  
 $h_{\max}$  — ?

**Решение**

Выполним пояснительный рисунок (рис. 1): начало координат свяжем с точкой на поверхности Земли, где мяч оторвался от бутсы футболистки; ось  $OY$  направим вертикально вверх; ось  $OX$  — горизонтально.

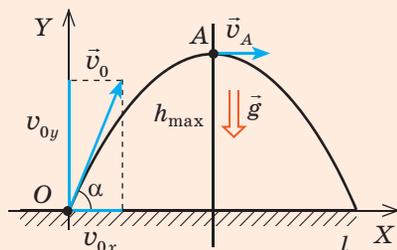


Рис. 1

В выбранной системе отсчета движение:

вдоль оси  $OX$  — равномерное:

$$v_x = v_{0x}, \quad x = x_0 + v_{0x}t, \quad (1)$$

где  $x_0 = 0$ ,  $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$ .

вдоль оси  $OY$  — равноускоренное:

$$v_y = v_{0y} + g_y t, \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $y_0 = 0$ ,  $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ ,  $g_y = -g$ .

Поэтому уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad x = v_0 \cos \alpha \cdot t.$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}.$$

Время  $t_1$  движения мяча до верхней точки траектории (точки  $A$ ) найдем из условия  $v_y(t_1) = 0$ :

$$v_0 \sin \alpha - gt_1 = 0 \Rightarrow t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Координата  $y$  мяча в точке  $A$  — это максимальная высота подъема мяча:

$$h_{\max} = y_A = v_0 \sin \alpha \cdot t_1 - \frac{gt_1^2}{2}.$$

После подстановки  $t_1$  получаем формулы для определения максимальной высоты

подъема и общего времени движения мяча:  $h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$ ;  $t = 2t_1 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$ .

Дальность  $L$  полета мяча равна координате  $x$  тела в конце движения ( $x = L$ ):

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t = v_0 \cos \alpha \cdot \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \text{ Поскольку } 2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \sin 2\alpha, \text{ то } L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

**Обратите внимание!** Из последней формулы следует:

- если бросить тело под углом  $\alpha$ , а затем под углом  $90^\circ - \alpha$ , то дальность полета не изменится, то есть тело попадет в ту же точку, двигаясь разными траекториями (рис. 2);
- максимальной дальности полета тело достигает при  $\alpha = 45^\circ$  ( $\sin 2\alpha = 1$ ).

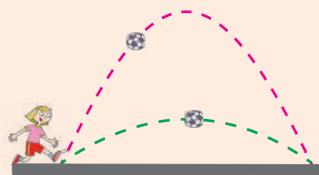


Рис. 2



### Подводим итоги

• Падение тел в безвоздушном пространстве, то есть падение только под действием силы тяжести, называют свободным падением.

• В случае свободного падения все тела падают на Землю с одинаковым ускорением — ускорением свободного падения ( $\vec{g}$ ). Вектор ускорения свободного падения всегда направлен вертикально вниз; по модулю  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  ( $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ ).

• Движение тела, брошенного вертикально вверх или вниз, — это равноускоренное прямолинейное движение с ускорением, равным ускорению свободного падения:  $\vec{a} = \vec{g}$ .

• Траектория движения тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, — параболическая. Такие движения рассматривают как результат сложения двух простых движений: горизонтального — равномерного вдоль оси  $OX$  и вертикального — равноускоренного (с ускорением  $\vec{g}$ ) вдоль оси  $OY$ . При этом уравнения зависимостей проекции скорости и координаты от вре-

мени имеют вид:  $v_x = v_{0x}$ ,  $x = x_0 + v_{0x}t$ ;  $v_y = v_{0y} + g_y t$ ,  $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$ .



### Контрольные вопросы

1. Какое движение тел называют свободным падением? Каков характер этого движения?
2. Как направлено ускорение свободного падения и чему оно равно?
3. Запишите в общем виде уравнение движения тела под действием силы тяжести.
4. Какой вид будут иметь уравнения движения, если тело брошено вертикально? горизонтально? под углом к горизонту?
5. Какова траектория движения тела, брошенного вертикально? горизонтально? под углом к горизонту? Приведите примеры.
6. Как определить модуль и направление скорости движения тела в любой точке траектории?



### Упражнение № 7

*Соппротивлением воздуха пренебречь. Считайте, что  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .*

1. Металлический шарик подняли на высоту 1,8 м над полом ипустили. На какой высоте ускорение свободного падения шарика будет наибольшим: а) на высоте 1,8 м; б) на высоте 1 м; в) в момент удара о пол? На какой высоте из указанных будет наибольшей скоростью движения шарика? Определите эту скорость.
2. Стрелу выпустили из лука вертикально вверх со скоростью 10 м/с. Известно, что через 2 с она уже падала вниз с той же скоростью. Определите максимальную высоту полета, путь и перемещение стрелы в течение этих 2 с.
3. Струя воды, направленная под углом  $60^\circ$  к горизонту, достигла высоты 15 м.
  - 1) Найдите: а) скорость вытекания воды; б) время полета частиц струи; в) дальность полета частиц струи.
  - 2) Какова будет дальность полета частиц струи, если направить струю под углом  $30^\circ$  к горизонту?
  - 3) Почему струя воды постепенно расширяется?
4. Из вертолета, который на высоте 45 м движется со скоростью 10 м/с, упал небольшой тяжелый предмет. Через какой интервал времени предмет упадет на землю? Какой будет скорость движения предмета в этот момент? Решите задачу для случаев, когда вертолет: 1) поднимается; 2) снижается; 3) движется горизонтально.

## § 8. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ



В древности воины использовали пращу — простое оружие для метания камней, ядер и т. п.: на среднюю часть сложенной веревки (или полоски кожи) помещали «снаряд», раскручивали веревку по круговой траектории и отпускали один конец — «снаряд» летел к цели. Почему «снаряд» не продолжает двигаться по окружности, а ведет себя так, будто его бросили в определенном направлении с очень большой скоростью? Об этой и других особенностях движения по окружности вы узнаете из данного параграфа.

1

### Каковы особенности криволинейного движения

Движение по окружности — это *криволинейное движение*, а любое криволинейное движение гораздо сложнее прямолинейного.

- Во-первых, при криволинейном движении изменяются как минимум две координаты тела.
- Во-вторых, непрерывно изменяется направление вектора мгновенной скорости: этот вектор всегда совпадает с касательной к траектории движения тела в рассматриваемой точке и направлен в сторону движения тела (рис. 8.1, 8.2).
- В-третьих, криволинейное движение — это всегда движение с ускорением: даже если модуль скорости остается неизменным, направление скорости непрерывно изменяется.



Какой может быть траектория камня, выпущенного из пращи? В какой момент воин должен отпустить конец веревки, чтобы камень полетел как можно дальше?

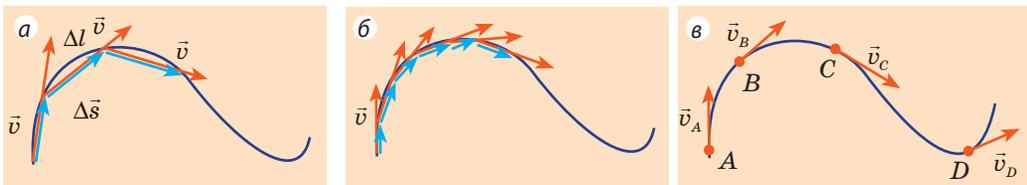
2

### Что такое линейная скорость

Скалярную физическую величину, которая характеризует криволинейное движение и равна средней путевой скорости, измеренной за бесконечно малый интервал времени, называют **линейной скоростью движения тела**:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \text{ если } \Delta t \rightarrow 0$$

Поскольку для очень малых интервалов времени модуль перемещения ( $\Delta s$ ) приближается к длине участка траектории ( $\Delta l$ ) (см. рис. 8.1), *линейная скорость в данной точке равна модулю мгновенной скорости*. Именно линейную скорость имеют в виду, когда, например, характеризуют движение



**Рис. 8.1.** Разбивая траекторию движения тела на все меньшие участки  $\Delta l$ , видим, что вектор скорости все больше приближается к касательной (а, б). В данной точке мгновенная скорость направлена вдоль касательной к траектории движения тела (в)

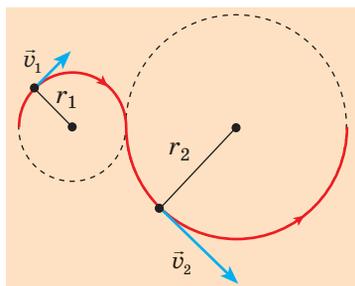


**Рис. 8.2.** Скорости движения искр фейерверка, брызг из-под колес автомобиля, металлических опилок направлены по касательной к окружности. Именно в этом направлении частицы продолжают свое движение после отрыва

автомобиля на повороте, описывают движение частицы в ускорителе, говорят о скорости полета искусственных спутников Земли и т. п.

Со временем линейная скорость может оставаться неизменной, а может изменяться. В зависимости от этого в физике рассматривают *равномерное криволинейное движение* (движение с постоянной линейной скоростью) и *неравномерное криволинейное движение* (движение с изменяющейся линейной скоростью).

При *равномерном криволинейном движении* за любые равные интервалы времени тело проходит одинаковый путь, потому что *линейную скорость движения тела можно определить по формуле:*



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

где  $l$  — путь, пройденный телом за время  $t$ .

**Рис. 8.3.** В каждой точке круговой траектории скорость движения направлена вдоль касательной к окружности, то есть перпендикулярно радиусу

Описывать криволинейное движение достаточно сложно, ведь форм криволинейных траекторий — множество. Однако практически любую сложную криволинейную траекторию можно представить как совокупность дуг различных радиусов, а криволинейное движение рассматривать как движение по окружности (рис. 8.3). Рассмотрим самый простой вид криволинейного движения — *равномерное движение по окружности*.

### 3

## Равномерное движение по окружности

**Равномерное движение тела по окружности** — это такое криволинейное движение, при котором траекторией движения тела является окружность, а линейная скорость не изменяется со временем.

Из курса физики 7 класса вы знаете, что равномерное движение по окружности достаточно часто является периодическим движением, а следовательно, характеризуется такими физическими величинами, как *период* и *частота*.

**Период вращения  $T$**  — физическая величина, равная интервалу времени, за который тело совершает один оборот:  $T = \frac{t}{N}$  ( $N$  — число оборотов за интервал времени  $t$ ). *Единица периода вращения в СИ — секунда:  $[T]=1$  с.*

**Частота вращения**  $n$  — физическая величина, численно равная количеству оборотов тела за единицу времени:  $n = \frac{N}{t}$ . Единица частоты вращения

в СИ — оборот в секунду:  $[n] = 1 \frac{\text{об}}{\text{с}} = 1 \text{ с}^{-1} \left( \frac{\text{р}}{\text{с}}, \text{с}^{-1} \right)$ .

Период и частота вращения — взаимно обратные величины:  $T = \frac{1}{n}$ .

Зная период вращения и радиус круговой траектории, легко определить **линейную скорость**  $v$  равномерного движения тела по окружности. Действительно, за время одного оборота ( $t = T$ ) тело проходит путь, равный длине окружности:  $l = 2\pi r$ . Поскольку  $v = l/t$ , имеем:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (1)$$

Для характеристики равномерного движения тела по окружности кроме линейной скорости часто используют **угловую скорость**.

**Угловая скорость** — это физическая величина, численно равная углу поворота радиуса за единицу времени:

$$\omega = \frac{\varphi}{t},$$

где  $\omega$  — угловая скорость;  $\varphi$  — угол поворота радиуса за интервал времени  $t$  (рис. 8.4).

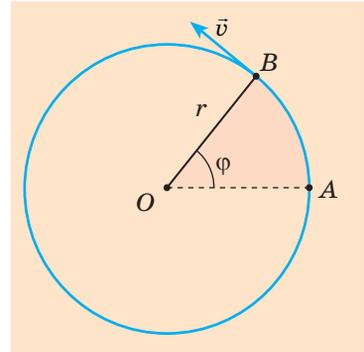
Единица угловой скорости в СИ — **радиан в секунду**:  $[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 1 \text{ с}^{-1} \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \text{с}^{-1} \right)$ .

За время, равное одному периоду ( $t = T$ ), радиус совершает один оборот ( $\varphi = 2\pi$ ), поэтому угловую скорость можно вычислить по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что угловая и линейная скорости связаны соотношением:

$$v = \omega r$$



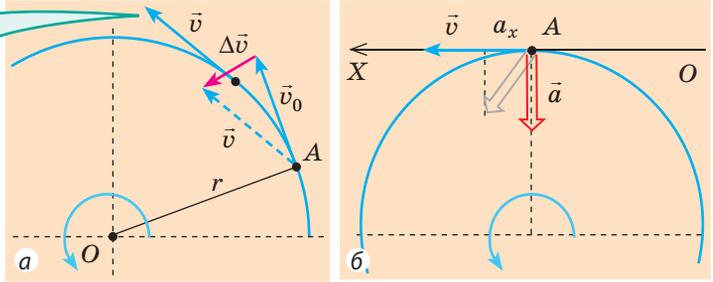
**Рис. 8.4.** Равномерное движение тела по окружности:  $r$  — радиус окружности;  $\vec{v}$  — вектор мгновенной скорости в точке  $B$ ;  $\varphi$  — угол поворота радиуса

#### 4 Почему при равномерном движении тела по окружности ускорение называют центростремительным

Определим направление ускорения при равномерном движении тела по окружности. По определению  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , поэтому направления векторов ускорения и изменения скорости совпадают ( $\vec{a} \uparrow \Delta \vec{v}$ ). Определим направление вектора изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  (рис. 8.5, а). Видим, что вектор  $\Delta \vec{v}$  направлен к середине окружности, так же направлен и вектор ускорения  $\vec{a}$ .

Докажем, что вектор  $\vec{a}$  направлен непосредственно к центру окружности, то есть вдоль радиуса. Поскольку мгновенная скорость  $\vec{v}$  движения

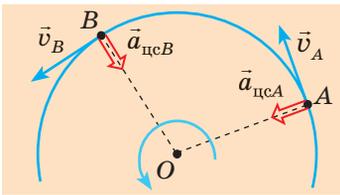
Перенесем вектор  $\vec{v}$  параллельно самому себе так, чтобы он исходил из точки  $A$ , и найдем разность векторов  $(\vec{v} - \vec{v}_0)$  — вектор изменения скорости ( $\Delta\vec{v}$ )



**Рис. 8.5.** Определение направления ускорения равномерного движения тела по окружности

тела направлена по касательной, а касательная перпендикулярна радиусу  $r$ , нужно доказать, что  $\vec{a} \perp \vec{v}$ .

Доказательство проведем методом от противного. Допустим, что вектор ускорения  $\vec{a}$  (серая стрелка на рис. 8.5, б) не перпендикулярен вектору мгновенной скорости  $\vec{v}$ . Однако в таком случае скорость тела будет увеличиваться, если  $a_x > 0$ , и уменьшаться, если  $a_x < 0$ , — следовательно, речь идет о неравномерном движении, тогда как мы рассматриваем равномерное. Таким образом, наше предположение было неверным. Следовательно  $\vec{a} \perp \vec{v}$ .



**Рис. 8.6.** При равномерном движении по окружности ускорение движения тела в данной точке всегда направлено к центру окружности (является перпендикулярным мгновенной скорости)

При равномерном движении тела по окружности:

- вектор ускорения направлен к центру окружности — именно поэтому ускорение равномерного движения тела по окружности называют **центростремительным ускорением**  $\vec{a}_{цс}$  (рис. 8.6);
- модуль центростремительного ускорения вычисляют по формулам:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{r} \quad (*) \quad ; \quad a_{цс} = \omega^2 r ,$$

где  $v$  — линейная скорость;  $r$  — радиус окружности;  $\omega$  — угловая скорость.



### Подводим итоги

- Криволинейное движение, при котором траекторией движения тела является окружность, а линейная скорость не изменяется со временем, называют **равномерным движением по окружности**.
- При равномерном движении тела по окружности:
  - мгновенная скорость перпендикулярна радиусу окружности, по модулю равна линейной скорости и вычисляется по формулам:  $v = \frac{l}{t}$ ;  $v = \frac{2\pi r}{T}$ , где  $T$  — период вращения;  $r$  — радиус окружности;

\* Попробуйте получить данную формулу самостоятельно. При необходимости воспользуйтесь дополнительными источниками информации.

— угловая скорость численно равна углу поворота радиуса за единицу времени:  $\omega = \frac{\varphi}{t}$ ;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  — и связана с линейной скоростью:  $v = \omega r$ ;

— ускорение является центростремительным, то есть направлено к центру окружности;  $a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}$ ;  $a_{\text{цс}} = \omega^2 r$ .



### Контрольные вопросы

**1.** Может ли тело двигаться по криволинейной траектории без ускорения? Обоснуйте свой ответ. **2.** Как в случае криволинейного движения направлен вектор мгновенной скорости? **3.** Какие физические величины описывают равномерное движение тела по окружности? Охарактеризуйте их. **4.** Каким соотношением связаны угловая и линейная скорости движения? Выведите это соотношение. **5.** Докажите, что при равномерном движении по окружности ускорение направлено к центру окружности. **6.** По каким формулам определяют центростремительное ускорение?



### Упражнение № 8

**1.** Для чего поверх колес велосипеда надевают шитки?  
**2.** На рис. 1 представлена траектория автомобиля, движущегося с постоянной скоростью. В какой из указанных точек траектории центростремительное ускорение автомобиля наибольшее? наименьшее?

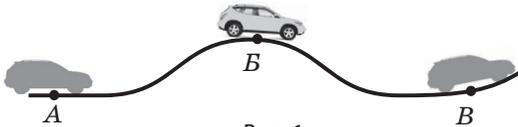


Рис. 1

**3.** Автомобиль движется с постоянной скоростью 36 км/ч по выпуклому мосту с радиусом кривизны 30 м. Чему равно и куда направлено ускорение движения автомобиля?

**4.** Мальчик и девочка равномерно движутся по окружностям разных радиусов:  $r_2 = 1,5r_1$  (рис. 2). Во сколько раз скорость движения мальчика должна быть больше скорости движения девочки, чтобы они все время находились на одном радиусе? Во сколько раз будут отличаться ускорения их движений?

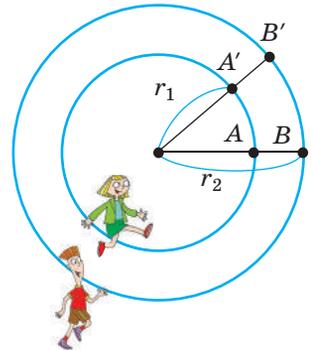


Рис. 2

**5.** Точка на ободе колеса велосипеда движется с ускорением  $100 \text{ м/с}^2$ , радиус колеса — 0,4 м. С какой скоростью движется велосипед? Сколько оборотов в минуту совершает колесо? Считайте, что  $\pi^2 = 10$ .

**6.** Минутная стрелка часов в три раза длиннее секундной. Во сколько раз больше ускорение движения конца секундной стрелки?

**7.** С какой скоростью должен лететь самолет над экватором Земли, чтобы для людей в самолете Солнце не изменяло своего положения на небосводе?



### Экспериментальное задание

Определите центростремительное ускорение, линейную и угловую скорости движения точки на диске микроволновой печи (игрушечного автомобиля, миксера и т. п.). Какие измерения нужно сделать для выполнения задания?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

**Тема.** Определение ускорения тела при равноускоренном прямолинейном движении.

**Цель:** определить ускорение движения шарика, скатывающегося по наклонному желобу.

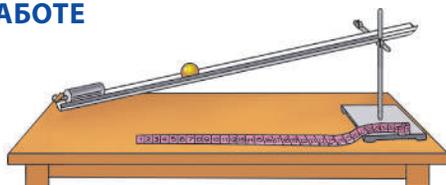
**Оборудование:** металлический или деревянный желоб, шарик, штатив с муфтой и лапкой, секундомер, измерительная лента, металлический цилиндр или другой предмет для остановки движения шарика по желобу.

### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



#### Подготовка к эксперименту

1. Закрепите желоб в лапке штатива. Опустите лапку, расположив желоб под небольшим углом к горизонту (см. рисунок).
2. В нижней части желоба расположите металлический цилиндр.
3. В верхней части желоба сделайте отметку.



#### Эксперимент

*Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.*

1. Измерьте расстояние  $s$  от отметки до цилиндра (это расстояние равно модулю перемещения шарика вдоль желоба).
2. Расположите шарик напротив метки и измерьте время  $t_1$ , за которое скатывается шарик (до момента его удара о металлический цилиндр).
3. Повторите опыт еще три раза.



#### Обработка результатов эксперимента

1. Вычислите среднее время движения шарика:  $t_{cp} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) / 4$ .

2. Рассчитайте среднее значение ускорения шарика:  $a_{cp} = 2s / t_{cp}^2$ .

3. Вычислите абсолютную и относительную погрешности измерения:

$$1) \text{ времени: } \Delta t_{cp} = \frac{|t_1 - t_{cp}| + |t_2 - t_{cp}| + |t_3 - t_{cp}| + |t_4 - t_{cp}|}{4}; \quad \epsilon_t = \Delta t_{cp} / t_{cp};$$

$$2) \text{ модуля перемещения: } \Delta s = \Delta s_{\text{приб}} + \Delta s_{\text{сл}}; \quad \epsilon_s = \Delta s / s;$$

$$3) \text{ модуля ускорения: } \epsilon_a = \epsilon_s + 2\epsilon_t; \quad \Delta a = \epsilon_a \cdot a_{cp}.$$

4. Округлите результаты и запишите результат измерения ускорения.

Номер опыта	Перемещение шарика $s$ , м	Время движения шарика		Ускорение шарика $a_{cp}$ , м/с <sup>2</sup>	Погрешность измерения ускорения		Результат измерения ускорения $a = a_{cp} \pm \Delta a$ , м/с <sup>2</sup>
		$t_i$ , с	$t_{cp}$ , с		относительная $\epsilon_a$ , %	абсолютная $\Delta a$ , м/с <sup>2</sup>	



#### Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором укажите: 1) величину, которую вы измеряли; 2) результат измерения; 3) причины погрешности; 4) измерение какой величины дает наибольшую погрешность.



#### Творческое задание

Подумайте, от каких факторов зависит ускорение, с которым тело скатывается по наклонной плоскости. Запишите план проведения соответствующего эксперимента, проведите его и сделайте вывод о правильности вашего предположения.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

**Тема.** Изучение движения тела по окружности.

**Цель:** определить характеристики равномерного движения шарика по окружности: период вращения, частоту вращения, линейную скорость, центростремительное ускорение и модуль равнодействующей сил, придающих шарiku данное ускорение.

**Оборудование:** штатив с муфтой и стержнем, нить длиной 50–60 см, лист плотной бумаги, циркуль, весы с гирями, секундомер, металлический шарик, линейка, динамометр.

### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



#### Подготовка к эксперименту

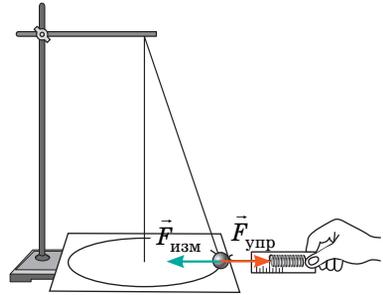
Начертите на листе концентрические окружности радиусами 15 и 20 см.



#### Эксперимент

Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.

1. Измерьте массу шарика.
2. Соберите установку (см. рисунок).
3. Раскрутите маятник так, чтобы траектория движения шарика как можно точнее повторяла одну из окружностей. Измерьте интервал времени  $t$ , за который шарик совершит 5 оборотов.
4. Измерьте модуль равнодействующей  $\vec{F}_{\text{изм}}$ , уравновесив ее силой  $\vec{F}_{\text{упр}}$  упругости пружины динамометра.
5. Проведите аналогичный опыт для второй окружности.



#### Обработка результатов эксперимента

1. Определите период вращения  $T$ , частоту вращения  $n$ , линейную скорость  $v$  движения шарика:  $T = \frac{t}{N}$ ;  $n = \frac{N}{t}$ ;  $v = \frac{2\pi r}{T}$ .
2. Определите модуль центростремительного ускорения шарика:  $a_{\text{цс}} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ .
3. Определите модуль равнодействующей  $\vec{F}$  сил, которые дают движущемуся шарiku центростремительное ускорение:  $F = ma_{\text{цс}}$ .
4. Сравните измеренное и вычисленное значения равнодействующей сил, определите относительную погрешность экспериментальной проверки равенства  $F = F_{\text{изм}}$  (см. п. 5 § 2).

Масса шарика $m$ , кг	Радиус окружности $r$ , м	Время движения $t$ , с	Количество оборотов $N$	Равнодействующая $F_{\text{изм}}$ , Н	Период вращения $T$ , с	Частота вращения $n$ , с <sup>-1</sup>	Линейная скорость $v$ , м/с	Центростремительное ускорение $a_{\text{цс}}$ , м/с <sup>2</sup>	Равнодействующая $F$ , Н



#### Анализ результатов эксперимента

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором укажите: 1) физические величины, которые вы определяли; 2) точность проведенного эксперимента и причины погрешности.

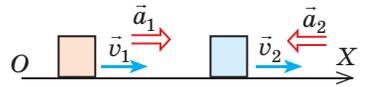
# ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА I «МЕХАНИКА».

## Часть 1. Кинематика

1. Вы вспомнили *равномерное прямолинейное и равноускоренное прямолинейное движения* и основные физические величины, их характеризующие.

### ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Скорость и ускорение направлены вдоль траектории движения тела.



равномерное	равноускоренное
<p>Ускорение движения тела: <math>a = 0</math></p>	<p>Проекция ускорения движения тела:</p>
<p>Проекция скорости движения тела:</p> $v_x = \frac{s_x}{t}$	<p>Проекция скорости движения тела:</p> $v_x = v_{0x} + a_x t$
<p>Проекция перемещения тела:</p> $s_x = v_x t$	<p>Проекция перемещения тела:</p> $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$
<p>Координата тела:</p> $x = x_0 + v_x t$	<p>Координата тела:</p> $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$

2. Вы углубили свои знания о *движении тела под действием силы тяжести*.

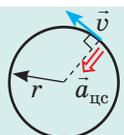
Движение тела, брошенного вертикально	Движение тела, брошенного горизонтально или под углом $\alpha$ к горизонту
<p> <math>a = g \approx 10 \text{ м/с}^2</math>  <math>v_y = v_{0y} + g_y t</math>  <math>y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}</math> </p>	<p> <math>l = v_0 t</math>  <math>h = \frac{g t^2}{2}</math>  <math>v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}</math> </p> <p> <math>l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}</math>  <math>h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}</math>  <math>v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}</math> </p>

3. Вы изучили *равномерное движение тела по окружности*.

### Равномерное движение по окружности

Период вращения:  $T = t/N$ ;  $[T] = 1 \text{ с}$  (секунда)  
 Угловая скорость:  $\omega = 2\pi/T$ ;  $[\omega] = 1 \text{ рад/с}$  ( $\text{с}^{-1}$ )  
 Линейная скорость:  $v = 2\pi r/T = \omega r$ ;  $[v] = 1 \text{ м/с}$   
 Центробежное ускорение:  $a_{\text{цс}} = v^2/r = \omega^2 r$ ;  
 $[a_{\text{цс}}] = 1 \text{ м/с}^2$

Ускорение  $\vec{a}_{\text{цс}}$  направлено к центру окружности; мгновенная скорость  $\vec{v}$  — по касательной к окружности



# ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ I «МЕХАНИКА».

## Часть 1. Кинематика

Задания 1–4 содержат только один правильный ответ.

- (1 балл) Ученицу можно считать материальной точкой, когда измеряют:  
а) ее рост; б) массу; в) давление, которое она оказывает на пол; г) расстояние, которое она проходит.
- (1 балл) Тело, брошенное под углом к горизонту, движется только под действием силы тяжести. Ускорение движения тела:  
а) больше в момент начала движения; б) одинаковое в любой момент движения; в) меньше в наивысшей точке траектории; г) увеличивается во время подъема.
- (1 балл) Автомобиль движется по прямолинейной трассе. Какой участок графика (рис. 1) соответствует движению с наибольшим по модулю ускорением, если ось  $Ox$  направлена вдоль трассы?  
а)  $AB$ ; б)  $BC$ ; в)  $CD$ ; г)  $DE$ .

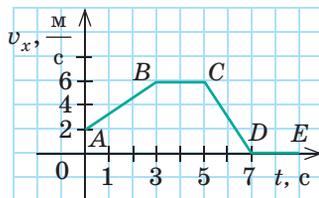


Рис. 1

- (2 балла) Малыш катается на карусели, двигаясь по окружности радиусом 5 м. Какими будут путь  $l$  и модуль перемещения  $s$  малыша, когда диск карусели совершит один полный оборот?  
а)  $l=0$ ,  $s=0$ ; б)  $l=31,4$  м,  $s=0$ ; в)  $l=0$ ,  $s=5$  м; г)  $l=31,4$  м,  $s=5$  м.
- (2 балла) Пассажирский поезд длиной 280 м движется со скоростью 72 км/ч. По соседнему пути в том же направлении движется со скоростью 36 км/ч товарный поезд длиной 700 м. В течение какого интервала времени пассажирский поезд пройдет вдоль товарного поезда?
- (3 балла) По графику проекции скорости движения автомобиля (см. рис. 1) определите его перемещение и среднюю путевую скорость за первые 5 с.
- (3 балла) Движение тела задано уравнением  $x = 0,5 + 5t - 2t^2$  (м). Определите перемещение тела за первые 2 с движения; скорость движения тела через 3 с. Считайте, что в выбранной системе отсчета тело двигалось вдоль оси  $Ox$ .
- (3 балла) Из точки  $A$ , расположенной на высоте 2,75 м над поверхностью земли, вертикально вверх бросили мяч со скоростью 5 м/с. Когда мяч достиг наивысшей точки своего подъема, из точки  $A$  с той же скоростью бросили вверх второй мяч. Определите высоту, на которой столкнутся мячи.
- (4 балла) Каскадер перепрыгивает с одной крыши на другую. Крыши расположены на одной высоте, расстояние между ними 4,9 м. Какой должна быть наименьшая скорость каскадера? Какой наибольшей высоты он при этом достигнет?
- (4 балла) Тело движется вдоль оси  $Ox$  с начальной скоростью 4 м/с. Воспользовавшись графиком  $x(t)$  (рис. 2): 1) запишите уравнение координаты; 2) постройте график зависимости  $v_x(t)$ .

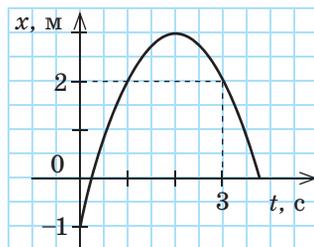


Рис. 2

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, выполненные правильно, и подсчитайте сумму баллов. Разделите эту сумму на два. Полученное число соответствует уровню ваших учебных достижений.



Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой — на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».

## ЧАСТЬ 2. ДИНАМИКА И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

### § 9. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА



Почему шарик набирает скорость? Почему останавливается? Как он будет двигаться, если угол наклона уменьшить до нуля? В конце XVI в. Г. Галилей, рассматривая движение разных тел по наклонной плоскости, провел мысленный эксперимент и пришел к выводу о существовании явления *инерции* (от лат. *inertia* — бездействие).

#### 1 Вспоминаем закон инерции

Что является естественным для тела — движение или покой? Древнегреческий философ Аристотель утверждал, что покой, ведь для того, чтобы тело двигалось, нужно действовать на него определенным образом, а если действие прекратится, тело остановится. Кажется, что об этом свидетельствует и наш повседневный опыт. Но действительно ли это так?

❓ Почему остановятся тела (рис. 9.1), если прекратить их толкать, тянуть и т. п.? Остановятся ли тела, если исчезнет сопротивление их движению?

Надеемся, вы правильно ответили на вопрос и пришли к выводу, к которому в свое время пришел Г. Галилей: «Сообщенная движущемуся телу скорость будет сохраняться, если устранены внешние причины ускорения или замедления движения». Итак, «естественным» для тела является не только состояние покоя, но и прямолинейное равномерное движение.

■ **Закон инерции Галилея:** тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя, если на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.

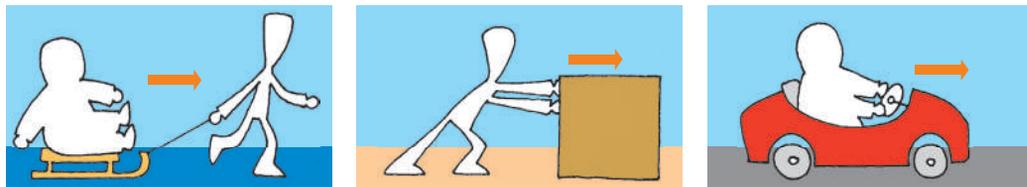
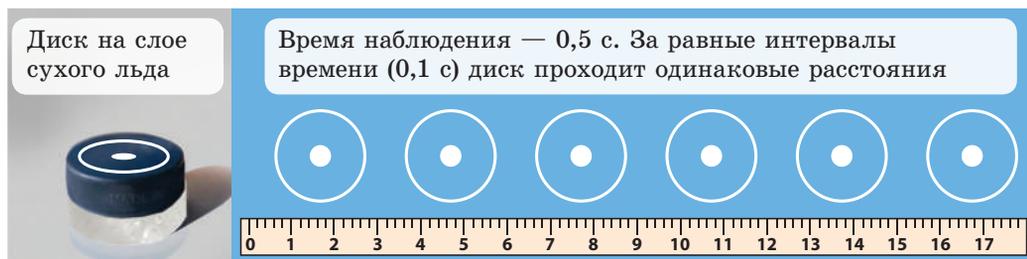


Рис. 9.1. К заданию в § 9



**Рис. 9.2.** Чем меньше трение (сопротивление движению тела), тем больше горизонтальное движение тела приближается к движению по инерции

Тело, на которое не действуют другие тела и поля, называют *изолированным* (свободным), а *движение изолированного тела — движением по инерции*. В реальности практически невозможно создать условия, когда на тело ничто не действует, поэтому *движением по инерции называют равномерное прямолинейное движение при отсутствии или скомпенсированности действия на тело других тел и полей* (рис. 9.2).

## 2 Что постулирует первый закон Ньютона

*Явление сохранения телом состояния покоя или равномерного прямолинейного движения при условии, что на него не действуют другие тела и поля или их действия скомпенсированы, называют явлением инерции.*

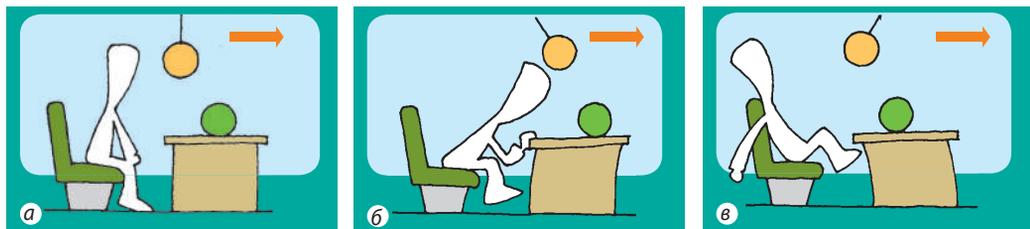
Вместе с тем состояние движения и состояние покоя зависят от выбора системы отсчета (СО). А в каждой ли СО наблюдается явление инерции? Из курса физики 9 класса вы хорошо знаете, что не в каждой.

Систему отсчета, относительно которой наблюдается явление инерции, называют **инерциальной системой отсчета**.

Представьте, что вы сидите в купе поезда, который время от времени увеличивает скорость, тормозит, осуществляет поворот и т. п. Понятно, что СО, связанная с поездом, будет *инерциальной* только тогда, когда поезд движется *равномерно прямолинейно*; во всех остальных случаях она будет *неинерциальной*, ведь относительно нее явление инерции наблюдаться не будет (рис. 9.3).

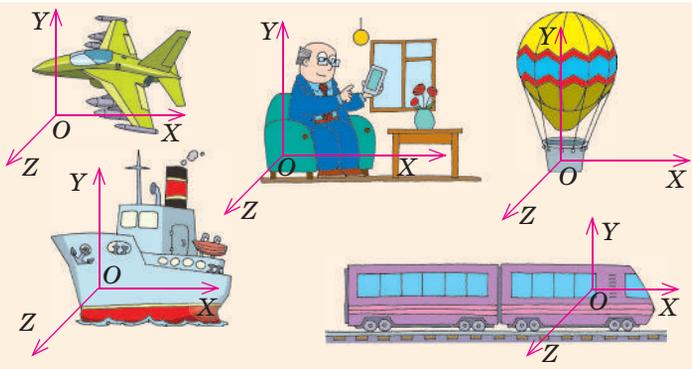
**?** На каком рисунке (см. рис. 9.3, а–в) показано, что поезд набирает скорость? тормозит? движется равномерно прямолинейно?

Чаще всего в качестве инерциальной выбирают СО, жестко связанную с точкой на поверхности Земли. Но эту систему можно считать инерциальной



**Рис. 9.3.** СО, связанная с поездом, будет инерциальной, только когда поезд относительно Земли находится в состоянии покоя или движется равномерно прямолинейно (а); во всех остальных случаях эта СО будет неинерциальной (б, в)

Если тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно, например, Земли, то и относительно  $CO$ , движущейся относительно Земли с неизменной скоростью, тело тоже будет сохранять состояние покоя или двигаться равномерно прямолинейно.



**Рис. 9.4.** Любая  $CO$  (связанная с самолетом, поездом и т. д.), если она движется относительно инерциальной  $CO$  (здесь —  $CO$ , связанной с домом) равномерно прямолинейно, тоже является инерциальной

только условно, поскольку Земля вращается вокруг своей оси. Для более точных измерений используют инерциальную  $CO$ , связанную с Солнцем и далекими звездами.

Если мы знаем хотя бы одну инерциальную  $CO$  (например,  $CO$ , связанную с домом, на рис. 9.4), то можем найти много других (см. рис. 9.4).

Закон инерции Г. Галилея стал первым шагом в установлении основных законов классической механики. Формулируя основные законы движения тел, И. Ньютон назвал этот закон первым законом движения. В современной физике **первый закон механики Ньютона** формулируют так:

■ Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют никакие силы или если эти силы скомпенсированы.

В такой формулировке первый закон Ньютона:

- постулирует существование инерциальных  $CO$  (утверждает, что они существуют);
- дает возможность из всех имеющихся  $CO$  выделить инерциальные  $CO$ ;
- содержит закон инерции (условия равномерного прямолинейного движения тела).

### 3 Принцип относительности Галилея

Рассматривая движение тел в разных инерциальных  $CO$ , Г. Галилей пришел к выводу, который называют **принципом относительности Галилея**:

■ Во всех инерциальных системах отсчета течение механических явлений и процессов происходит одинаково при одинаковых начальных условиях.

Галилей писал: «Если мы, находясь в каюте парусника, будем проводить какие-либо эксперименты, то ни сами эксперименты, ни их результаты не будут отличаться от тех, которые проводились бы на берегу. И только поднявшись на палубу, мы увидим: оказывается, наш корабль движется равномерно прямолинейно...».



### Подводим итоги

• Закон инерции: тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя, если на него не действуют другие тела или их действия скомпенсированы.

• Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют никакие силы или если эти силы скомпенсированы. Такие СО называют инерциальными.

• В качестве инерциальных обычно используют СО, связанные с Землей. Любая СО, движущаяся относительно инерциальной СО равномерно прямолинейно, тоже является инерциальной. Во всех инерциальных СО течение механических явлений и процессов одинаково при одинаковых начальных условиях.



### Контрольные вопросы

1. При каких условиях тело сохраняет скорость своего движения? Приведите примеры.
2. Сформулируйте закон инерции.
3. Какие СО называют инерциальными? неинерциальными? Приведите примеры.
4. Сформулируйте первый закон Ньютона. Что он постулирует?
5. Можно ли, находясь в инерциальной СО, с помощью механических экспериментов определить, движется эта система или находится в состоянии покоя?



### Упражнение № 9

1. Приведите примеры тел, которые относительно Земли находятся в состоянии покоя. Какие силы на них действуют? Что вы можете сказать об этих силах?
2. Какие СО, изображенные на рис. 1, возможно, являются инерциальными? Какие СО точно являются неинерциальными? Обоснуйте свой ответ.

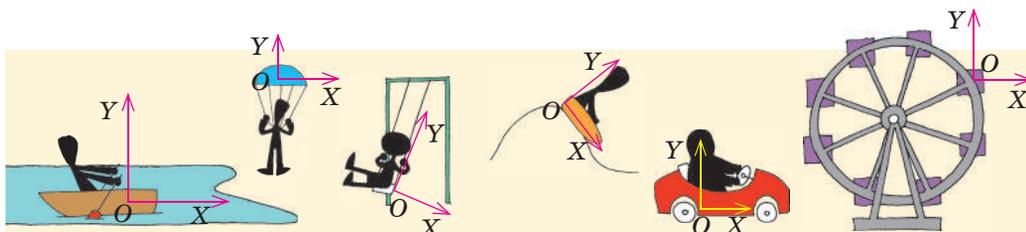


Рис. 1

3. От вершины отвесной скалы высотой 20 м оторвался обломок. За падением обломка наблюдают турист, стоящий на скале, и пассажир яхты, движущейся со скоростью 15 м/с. Для СО<sub>1</sub>, связанной с туристом, и для СО<sub>2</sub>, связанной с пассажиром яхты, определите перемещение и время падения обломка, ускорение и скорость его движения в момент падения.
4. Выясните, какие органы чувств в основном информируют человека о том, что он находится в неинерциальной СО.



5. Найдите направление и модуль равнодействующей сил, действующих на каждое тело (рис. 2; 1 клетка — 2 Н).

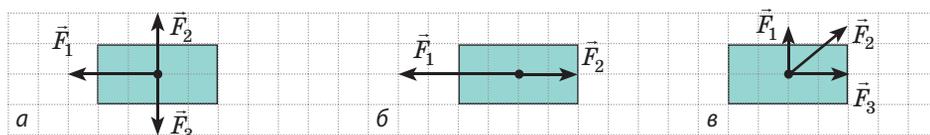


Рис. 2

## § 10. СИЛА. МАССА. ВТОРОЙ И ТРЕТИЙ ЗАКОНЫ НЬЮТОНА



### 1 Вспоминаем силу

Представьте: вы разогнались на велосипеде и перестали крутить педали. В конце концов велосипед обязательно остановится — его скорость постепенно упадет до нуля. А вот время остановки велосипеда, а следовательно, и его ускорение существенно зависят от того, нажимаете ли вы при этом на тормоз. То есть одно и то же тело *в результате разного воздействия (взаимодействия) получает разное ускорение*. В результате разного воздействия тело может также по-разному изменять свои форму и размеры — *деформироваться*. *Количественной мерой взаимодействия является сила.*

**Сила  $\vec{F}$**  в механике — это векторная физическая величина, являющаяся мерой взаимодействия тел, в результате которого тела получают ускорения или (и) деформируются.



**Рис. 10.1.** Если вы, играя в волейбол, ударите по мячу, то можете ускорить его движение, остановить, изменить направление движения или закрутить — это зависит от направления, точки приложения и силы удара

**Единица силы в СИ — ньютон:**  $[F]=1 \text{ Н (N)}$ . 1 Н равен силе, которая, действуя на тело массой 1 кг, сообщает ему ускорение 1 м/с<sup>2</sup>.

Силой называют также действие одного тела на другое. Например, можно сказать: на мяч действует сила упругости, хотя на самом деле на мяч действуют руки волейболиста, действие которых характеризует сила упругости.

Результат действия силы  $\vec{F}$  зависит от модуля  $F$  этой силы, ее направления и места приложения (если тело не является материальной точкой) (рис. 10.1).

**?** Приведите несколько примеров (движение, спорт, приготовление пищи и др.), когда необходимо задуматься, какую силу (большую или меньшую) нужно приложить и куда ее направить.

## 2 Почему тела по-разному реагируют на одно и то же действие

Изменение скорости движения тела зависит не только от силы, действующей на тело: если к теннисному мячу и метательному ядру приложить одинаковую силу, скорость движения ядра изменится меньше или для того же изменения скорости необходимо будет больше времени. То есть *разным телам свойственно по-разному реагировать на одно и то же действие*.

Свойство тела, которое заключается в том, что для изменения скорости движения тела под действием силы требуется некоторое время, называют **инертностью**.

Чем тело инертнее, тем меньшее ускорение оно приобретает в результате одного и того же действия. В приведенном выше примере ядро инертнее мяча, ведь в результате одного и того же действия оно медленнее мяча изменяет скорость своего движения. Инертные свойства тела характеризует *инертная масса тела*.

Любое тело имеет также свойство гравитационно взаимодействовать с другими телами. Это свойство характеризуется *гравитационной массой тела*. *Инертная масса тела равна его гравитационной массе*, поэтому далее будем говорить просто о *массе тела*.

**Масса  $m$**  — физическая величина, являющаяся мерой инертности и мерой гравитации тела.

*Единица массы в СИ — килограмм:  $[m]=1$  кг (kg).*

*Измерить массу тела означает сравнить ее с массой тела, масса которого принята за единицу.* Один из распространенных способов прямого измерения массы тела — взвешивание (масса — мера гравитации, поэтому тела равной массы одинаково притягиваются к Земле, а значит, одинаково давят на опору).

Взвешивание — самый удобный способ измерения массы, но не универсальный. Как, например, измерить массу молекулы или массу Луны, ведь положить эти объекты на весы невозможно? В таких случаях используют тот факт, что масса — мера инертности. Если на два тела массами  $m_1$  и  $m_2$  действуют одинаковые силы, то *сравнить массы этих тел можно, если определить ускорения, приобретенные телами в результате действия этих сил*:

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

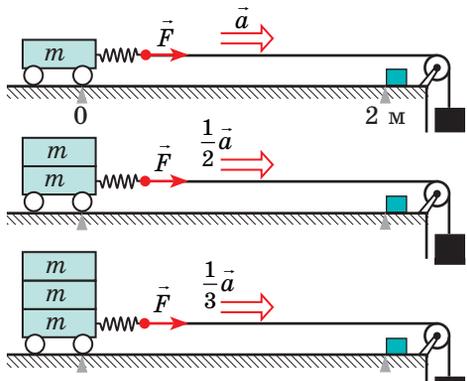
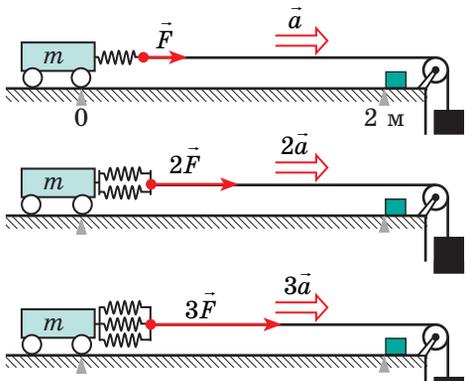
**?** Попробуйте доказать последнее утверждение, опираясь на второй закон Ньютона. Если не получится, вернитесь к вопросу после изучения пункта 3 § 10.

### Основные свойства массы

1. *Масса тела — величина инвариантная:* она не зависит ни от выбора системы отсчета, ни от скорости движения тела.
2. *В классической механике масса тела — величина аддитивная:* масса тела равна сумме масс всех частиц, из которых состоит тело, а масса системы тел равна сумме масс тел, образующих систему.
3. *В классической механике выполняется закон сохранения массы:* при любых процессах в системе тел общая масса системы остается неизменной; масса тела не изменяется при его взаимодействии с другими телами.

### 3 Второй закон Ньютона

Поставим на твердую горизонтальную поверхность легкоподвижную тележку и станем тянуть ее с помощью груза. Массу груза для каждого опыта будем подбирать так, чтобы растяжение пружин при движении тележки было одинаковым. Измеряя время  $t$ , в течение которого тележка проходит, например, расстояние  $s = 2$  м, будем определять ускорение движения тележки ( $a = 2s/t^2$ ):

Опыты, подтверждающие справедливость второго закона Ньютона	
<p><i>Масса тела (тележки) увеличивается; сила, действующая на тело, неизменна</i></p>  <p><i>Результат опыта: ускорение, которое приобретает тело, обратно пропорционально массе тела: <math>a \sim \frac{1}{m}</math>.</i></p>	<p><i>Масса тела (тележки) неизменна; сила, действующая на тело, увеличивается</i></p>  <p><i>Результат опыта: ускорение, которое приобретает тело, прямо пропорционально прилагаемой к телу силе: <math>a \sim F</math>.</i></p>
<p>Следовательно, <math>a \sim \frac{F}{m}</math>.</p>	

Учитывая, что единицу силы выбирают так, что коэффициент пропорциональности в выражении  $a \sim F/m$  равен 1, сформулируем **второй закон Ньютона**:

Ускорение, которое приобретает тело в результате действия силы, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе тела:

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

• Второй закон Ньютона, записанный в виде  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , выполняется *только в инерциальных системах отсчета*.

• Обычно на тело действуют несколько сил. Если тело можно считать материальной точкой, все эти силы можно заменить одной — равнодействующей. *Равнодействующая равна геометрической сумме сил, действующих на тело:*  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$  (рис. 10.2), поэтому второй закон Ньютона записывают так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}, \text{ или } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$$

• *Направление ускорения движения всегда совпадает с направлением равнодействующей сил, действующих на тело:  $\vec{a} \uparrow \vec{F}$ .*

- Если силы, действующие на тело, скомпенсированы, то есть *равнодействующая равна нулю* ( $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ ), тело не будет изменять скорость своего движения ни по значению, ни по направлению:  $\vec{a} = 0$  (рис. 10.3), а следовательно, будет двигаться *равномерно прямолинейно или находиться в состоянии покоя*.

- Тело движется *равноускоренно прямолинейно*, если *равнодействующая сил, приложенных к телу, не изменяется со временем*.

#### 4 Третий закон Ньютона

«Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе: действия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны» — так И. Ньютон сформулировал свою третью и последнюю «аксиому движения».

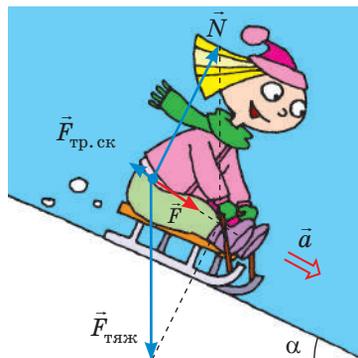
**?** Какие проявления третьей «аксиомы движения» вы наблюдаете сейчас? с какими «встретились» в течение дня? в течение недели?

*Силы всегда возникают парами*: если тело А действует на тело Б с силой  $\vec{F}_1$ , то обязательно есть «обратная» сила  $\vec{F}_2$ , действующая на тело А со стороны тела Б, причем сила  $\vec{F}_2$  равна по модулю силе  $\vec{F}_1$  и противоположна ей по направлению:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . А вот проявления этих сил (или одной из них) не всегда заметны. Например, когда яблоко упало с яблони, разбилось и примяло траву, мы видим и «действие», и «противодействие». Также хорошо заметно действие Земли на яблоко (яблоко упало), а вот противодействие (притяжение Земли к яблоку) мы не заметим.

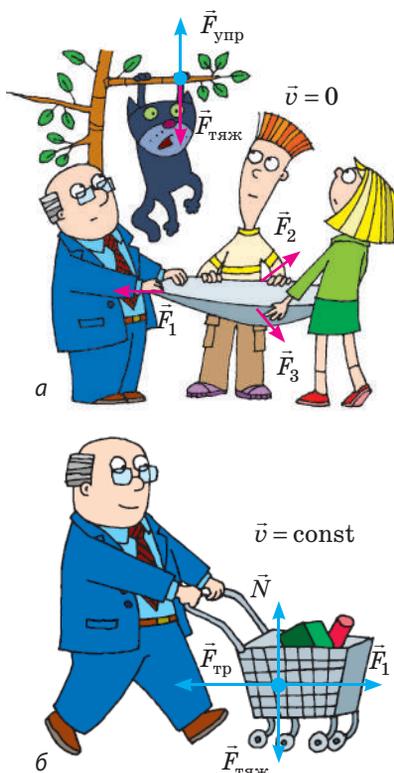
Подчеркнем: «действие» и «противодействие» — это всегда *силы одинаковой природы*, они всегда *направлены вдоль одной прямой* (рис. 10.4) — и сформулируем **третий закон Ньютона** в современном виде:

Тела взаимодействуют с силами, которые имеют одинаковую природу, направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:

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



**Рис. 10.2.** Сила  $\vec{F}$  — равнодействующая силы тяжести  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , силы  $\vec{N}$  нормальной реакции опоры и силы трения скольжения  $\vec{F}_{\text{тр. ск}}$ . Сила  $\vec{F}$  — причина ускорения  $\vec{a}$  девочки



**Рис. 10.3.** Если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю, тело находится в состоянии покоя (а) или движется с постоянной скоростью (б)



**Рис. 10.4.** Силы, возникающие при взаимодействии, имеют одинаковую природу, направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению

### 5 Смог бы Мюнхгаузен вытянуть себя за кошечку из болота

При любом взаимодействии двух тел возникает пара равных по модулю и противоположных по направлению сил. И очень хорошо, что *эти силы не имеют равнодействующей, ведь они приложены к разным телам и поэтому не могут уравновесить (компенсировать) друг друга*, иначе мы были бы обречены на неподвижность или на непрерывное равномерное прямолинейное движение.

Несколько иначе обстоит дело, когда точки, к которым приложена пара сил, являются частями одного тела (одной системы материальных точек). В таком случае векторная сумма всех внутренних сил системы равна нулю ( $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$  — складываются пары равных по модулю и противоположных по направлению сил), поэтому *внутренние силы не сообщают телу ускорения* (благодаря внутренним силам тело не может ни сдвинуться с места, ни остановиться, ни изменить направление движения). *Чтобы тело приобрело ускорение, нужны внешние силы.*

**?** Так смог бы барон Мюнхгаузен, герой известного произведения Р. Э. Распе, вытянуть себя из болота за волосы? А как смог бы?



### Подводим итоги

- Сила  $\vec{F}$  — векторная физическая величина, являющаяся мерой взаимодействия тел, в результате которого тела получают ускорения или (и) деформируются. Единица силы в СИ — ньютон (Н). Если на материальную точку одновременно действуют несколько сил, их можно заменить равнодействующей ( $\vec{F}$ ):  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ .

- Основной закон динамики — второй закон Ньютона: ускорение, которое приобретает тело в результате действия силы, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе тела:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Этот закон выполняется только в инерциальных СО.

- Третий закон Ньютона — закон взаимодействия: тела взаимодействуют с силами, которые имеют одинаковую природу, направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Пара сил, возникающих при взаимодействии двух тел, не уравновешивают друг друга, поскольку приложены к разным телам.



### Контрольные вопросы

**1.** Охарактеризуйте силу и массу как физические величины. **2.** Дайте определение инертности. **3.** На каких свойствах тела основан каждый из способов измерения массы? **4.** От каких факторов зависит ускорение движения тела? **5.** Сформулируйте второй закон Ньютона. **6.** Как записать второй закон Ньютона, если на тело действуют несколько сил? **7.** Сформулируйте третий закон Ньютона. Приведите примеры его проявления. **8.** Когда пара сил, возникающих при взаимодействии двух тел, уравнивают друг друга?



### Упражнение № 10

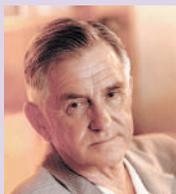
1. Благодаря инертности можно экономить автомобильное топливо. Как и почему это возможно?
2. Будет ли двигаться тележка (см. рисунок), если магниты достаточно мощные? Ответ обоснуйте.
3. Бильярдный шар под действием двух взаимно перпендикулярных сил 0,81 и 1,08 Н приобретает ускорение 5 м/с<sup>2</sup>. Определите массу шара.
4. Ответьте на вопросы, приведенные в начале § 10.
5. Поясните утверждение: «Инертность — это свойство тела, инерция — это явление природы».
6. Мальчик массой 60 кг прыгает с высоты 1,8 м. С какой силой ноги мальчика ударятся о землю, если он: 1) не согнул колени и время остановки составило 0,1 с? 2) согнул колени, и в результате время остановки увеличилось в 10 раз?
7. *Классическая задача.* Лошадь тянет телегу. Согласно третьему закону Ньютона: с какой силой лошадь тянет телегу, с такой же силой телега тянет лошадь. Почему же тогда телега движется за лошадью, а не наоборот?
8. Придумайте несколько простых задач на применение второго и третьего законов Ньютона. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации, чтобы данные задач были реальными. Оформите и решите эти задачи.



### Экспериментальное задание

Предложите несколько экспериментов для проверки третьего закона Ньютона. Проведите их.

### Физика и техника в Украине



**Олег Константинович Антонов** (1906–1984) — выдающийся украинский советский самолетостроитель, ведущий авиаконструктор СССР, академик АН УССР и АН СССР. О. К. Антонов — один из основателей советского планеризма. Он создал более 50 типов планеров, на которых были установлены многочисленные мировые рекорды. Однако мировую славу О. К. Антонов приобрел как конструктор надежных пассажирских и транспортных самолетов.

С 1946 г. О. К. Антонов — главный, а с 1967 г. — генеральный конструктор опытно-конструкторского бюро (сейчас оно называется Государственное предприятие «Антонов»).

Под руководством О. К. Антонова разработаны транспортные самолеты Ан-8, Ан-12, Ан-22, Ан-26, Ан-32, Ан-72, многоцелевые самолеты Ан-2, Ан-14, пассажирские самолеты Ан-10, Ан-24 и др. Транспортные самолеты Ан-124 «Руслан» и Ан-225 «Мрия» и сегодня незаменимы для перевозок крупногабаритных грузов.

НАНУ учредила премию им. О. К. Антонова за выдающиеся достижения в области технической механики и самолетостроения.



## § 11. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ. СИЛА ПРИТЯЖЕНИЯ. ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ



Шесть из восьми планет Солнечной системы были открыты благодаря наблюдениям за звездным небом. Именно так в 1781 г. английский астроном *Джон Гершель* открыл Уран. Впрочем, планета вела себя «странно»: ее орбита не соответствовала расчетам, основанным на законе всемирного тяготения. Ученые предположили, что рядом с Ураном есть еще одна планета, и начали искать ее с помощью... математики.

Рассчитать орбиту новой планеты удалось англичанину *Джону Адамсу* и французу *Урбену Леверье*. 23 августа 1846 г. немецкий астроном *Йоганн Галле* навел телескоп на указанное Леверье место и... увидел планету! Нептун — восьмая планета Солнечной системы — стал первым космическим объектом, открытым «на кончике пера». О законе, который позволил сделать это открытие, вы вспомните, изучив данный параграф.



«Луна упала бы на землю как камень, как только исчезла бы сила ее полета.

*Плутарх*  
(ок. 46 — ок. 127 гг.)



«Тяготение есть взаимное стремление всех тел. Если бы Землю и Луну не удерживала в их орбитах их оживляющая сила, то Земля и Луна слились бы... Не будь на Земле тяготения, океаны устремились бы на Луну».

*И. Кеплер* (1571–1630)



«До сих пор я объяснял небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения».

*И. Ньютон* (1643–1727)



«В наше время тяготение никого не удивляет — оно стало обычным непонятым явлением».

*Э. Мах* (1838–1916)

### 1 Как определить силу гравитационного притяжения

**Гравитационное взаимодействие** — взаимодействие, свойственное всем телам во Вселенной и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу.

Гравитационное взаимодействие происходит посредством **гравитационного поля**, которое существует вокруг любого тела: звезды, планеты, человека, молекулы и т. д.

Выведем *закон всемирного тяготения*, следуя логике рассуждений Ньютона, который и установил данный закон.

1. Благодаря гравитационному взаимодействию Земля придает всем телам вблизи ее поверхности ускорение  $g = F/m$  (второй закон Ньютона). Данное ускорение не зависит от массы тела — это возможно, если сила гравитационного взаимодействия прямо пропорциональна массе тела ( $F \sim m$ ).

2. Два тела массами  $m_1$  и  $m_2$  взаимодействуют с равными по модулю силами (третий закон Ньютона):  $F_1 = F_2 = F$  (рис. 11.1). При этом  $F_1 \sim m_1$ , а  $F_2 \sim m_2$ . Следовательно, *сила гравитационного взаимодействия двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел:*

$$F \sim m_1 \cdot m_2. \quad (1)$$

3. Проанализировав движение Луны вокруг Земли и опираясь на законы Кеплера (законы вращения планет вокруг Солнца), Ньютон доказал, что *сила гравитационного притяжения двух тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*:  $F \sim \frac{1}{r^2}$  (2).

Объединив выводы (1) и (2), И. Ньютон получил **закон всемирного тяготения**:

Любые два тела притягиваются друг к другу с силой, которая прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3)$$

где  $G$  — *гравитационная постоянная* (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел во Вселенной).

Закон всемирного тяготения имеет определенные *границы применимости* (рис. 11.2).

Только в XX в. было установлено: когда гравитационные поля настолько сильны, что разгоняют тела до скоростей порядка скорости света, или когда частицы, пролетающие вблизи массивных тел, еще на отдалении имеют скорость, сравнимую со скоростью света, силу гравитационного притяжения нельзя рассчитать по закону всемирного тяготения. *В общем случае тяготение описывается общей теорией относительности.*

## 2 Как измерить гравитационную постоянную

Гравитационная постоянная  $G$  — одна из фундаментальных констант в физике. По современным данным, значение гравитационной постоянной составляет:

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

Из формулы (3) следует:  $G = \frac{F r^2}{m_1 m_2}$ . То есть, если

$r = 1$  м, а  $m_1 = m_2 = 1$  кг, то  $G$  численно равна  $F$ .

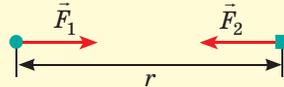
*Гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух материальных точек массой 1 кг каждая, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга.*



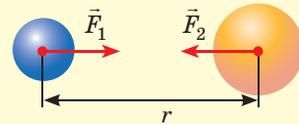
**Рис. 11.1.** Силы, с которыми тела притягиваются друг к другу, равны по модулю и противоположны по направлению

*Закон всемирного тяготения справедлив в таких случаях:*

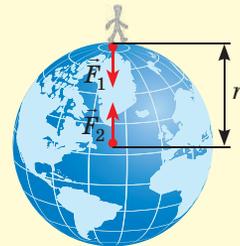
- если оба тела являются материальными точками



- если оба тела имеют шарообразную форму со сферическим распределением вещества



- если одно из взаимодействующих тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем размеры и масса второго тела



**Рис. 11.2.** Границы применимости закона всемирного тяготения

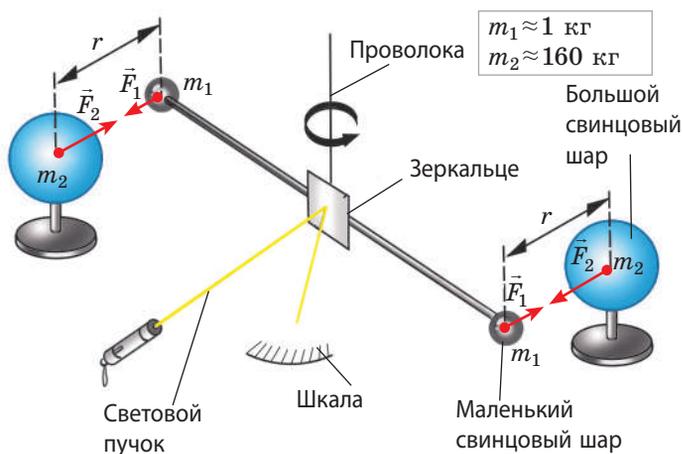


Рис. 11.3. Схема одного из первых опытов Г. Кавендиша

1. В результате притяжения шаров проволока закручивается. Угол закручивания проволоки регистрируют на шкале по повороту светового пучка, отражающегося от зеркальца.
2. По углу закручивания проволоки определяют силу  $F$  гравитационного притяжения.
3. Измеряют расстояние  $r$  между центрами шаров.
4. Зная массы  $m_1$  и  $m_2$  шаров, вычисляют гравитационную постоянную:  $G = F \frac{r^2}{m_1 m_2}$ .

Измерить гравитационную постоянную достаточно сложно: гравитационное притяжение между телами становится заметным только при очень большой массе хотя бы одного из тел.

**?** Определите силу притяжения шаров массой 1 т каждый, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, и вы поймете, почему мы не замечаем гравитационного притяжения других тел, за исключением притяжения Земли.

Гравитационную постоянную впервые измерил английский ученый *Генри Кавендиш* (1731–1810) в 1798 г. с помощью крутильных весов (рис. 11.3).

### 3 Как «взвесить» Землю

Опыт Г. Кавендиша еще называют «взвешиванием Земли». Как можно измерить массу Земли и любой другой планеты? Вспомним о силе тяжести.

**Сила тяжести**  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  — это сила, с которой Земля (или другое астрономическое тело) притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности или вблизи нее.

Сила тяжести направлена вертикально вниз и приложена к точке, которую называют *центром тяжести тела* (см. § 14).

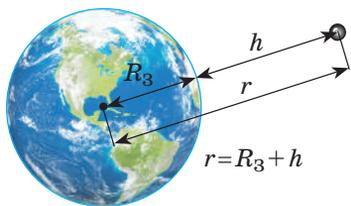


Рис. 11.4. Расстояние  $r$  от центра Земли до тела равно сумме радиуса Земли  $R_3$  и высоты  $h$ , на которой находится тело

• Согласно закону всемирного тяготения модуль силы тяжести, действующей на тело массой  $m$  со стороны Земли, равен:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2} \quad (1)$$

Здесь  $M_3$  — масса Земли;  $R_3 + h$  — расстояние от центра Земли до тела (рис. 11.4).

• Согласно второму закону Ньютона:

$$F_{\text{тяж}} = mg, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения на высоте  $h$ .

Приравняв правые части формул (1) и (2), получим формулу для вычисления ускорения свободного падения:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$$

Проанализировав последнюю формулу, приходим к следующим выводам.

1. Ускорение свободного падения не зависит от массы тела (доказано Г. Галилеем).

2. Ускорение свободного падения уменьшается при подъеме тела над поверхностью Земли (заметное изменение происходит при подъеме на десятки и сотни километров).

3. Если тело находится на поверхности Земли ( $h=0$ ) или вблизи нее ( $h \ll R_3$ ), ускорение свободного падения вычисляются по формуле:

$$g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2}$$

Вблизи поверхности Земли ускорение свободного падения известно ( $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ ), следовательно, можем определить массу Земли:

$$M_3 = \frac{g_0 R_3^2}{G}$$

Отметим, что из-за вращения Земли, а также из-за того, что форма Земли — *геоид*, ускорение свободного падения зависит от географической широты местности (рис. 11.5).

#### 4 Первая космическая скорость

Представим, что мы стреляем из пушки в горизонтальном направлении, с каждым выстрелом *увеличивая скорость движения ядра*. Траектория движения ядер будет параболической, и каждый раз ядра будут падать все дальше. Если представить, что Земля плоская, на этом наш эксперимент можно было бы и завершить, но Земля имеет форму шара, поэтому с каждым выстрелом она все больше и больше будет «уходить» из-под ядра (рис. 11.6).

Теперь представим, что сопротивление воздуха отсутствует, а мы придали ядру такую большую скорость, что оно облетело вокруг Земли и вернулось к месту выстрела.

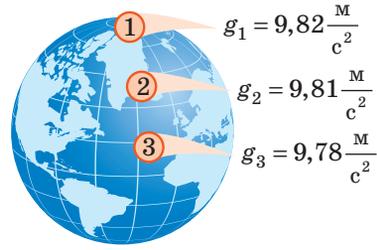


Рис. 11.5. Модуль ускорения свободного падения на экваторе немного меньше, чем на полюсах

Ускорение свободного падения в определенной местности может отличаться от его средних значений на данной широте. Причины — в неоднородности земной коры, наличии гор и впадин; в различной плотности пород, залегающих в недрах Земли. Так, уменьшение ускорения свободного падения часто свидетельствует о залежах торфа, нефти, газа; увеличение — о залежах металлических руд.

Метод поиска залежей полезных ископаемых по точному определению ускорения свободного падения называют *гравиметрической разведкой*.

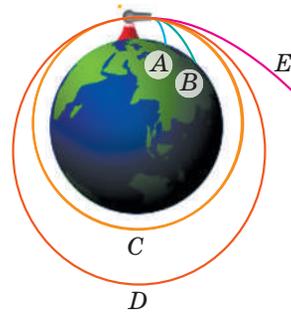
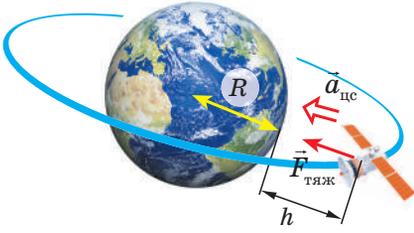


Рис. 11.6. Движение тела под действием силы тяжести (по рисунку И. Ньютона): ядра А и В падают на Землю, ядро С выходит на круговую орбиту, D — на эллиптическую, ядро E летит в открытый космос



**Рис. 11.7.** На спутник, движущийся по круговой орбите на высоте  $h$  над поверхностью планеты, действует одна сила — сила тяжести  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , которая и придает спутнику центростремительное ускорение  $\vec{a}_{\text{цс}}$

При этом ядро не остановится, а будет и дальше двигаться с неизменной скоростью, «наматывая круги» вокруг планеты. Другими словами, мы получим *искусственный спутник Земли*.

Скорость, которую надо сообщить объекту, чтобы он двигался вокруг планеты по круговой орбите, называют **первой космической скоростью**.

Первую космическую скорость  $v$  можно вычислить, учитывая, что именно сила тяжести придает телу центростремительное ускорение (рис. 11.7). По второму закону Ньютона:

$$F_{\text{тяж}} = ma_{\text{цс}}, \text{ где } F_{\text{тяж}} = G \frac{mM}{(R+h)^2}; \quad a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R+h}.$$

Следовательно,  $\frac{GM}{R+h} = v^2$ . Отсюда получаем формулу для вычисления первой космической скорости движения спутника на высоте  $h$  над поверхностью планеты:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}.$$

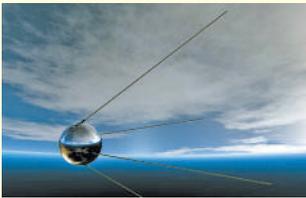
Для случаев вблизи поверхности Земли ( $h \approx 0$ ) данная формула принимает вид:

$$v = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3}}.$$

Вспомним, что у поверхности Земли  $g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2}$ , то

есть  $GM_3 = g_0 R_3^2$ . После упрощения получим:  $v = \sqrt{g_0 R_3}$ .

Поскольку  $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ , а  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ , то  $v = \sqrt{9,8 \cdot 6,4 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ (м/с)}$  — первая космическая скорость у поверхности Земли.



4 октября 1957 г. Советский Союз вывел на орбиту первый искусственный спутник Земли — ПС-1. Его разработали С. П. Королев, М. В. Келдыш, М. К. Тихонравов и другие выдающиеся ученые.

ПС-1 представлял собой небольшую сферу диаметром 58 см и массой 83,6 кг, оснащенную четырьмя антеннами длиной 2,4 и 2,9 м для передачи сигнала. Спутник отделился от второй ступени ракеты-носителя на 315-й секунде после старта и почти сразу начал передавать сигнал, который слышали не только специалисты, но и радиоловители практически всех стран. С этого момента начался отсчет космической эры человечества. «Тот маленький огонек, стремительнодвигающийся от края и до края неба... сделал человечество бессмертным», — писал американский писатель-фантаст Рэй Брэдбери.

В течение 92 суток полета спутник совершил 1440 оборотов вокруг Земли, после чего сгорел в атмосфере. Траекторию движения спутника на карту звездного неба первыми нанесли наблюдатели Лаборатории космических исследований Ужгородского государственного университета.



### Подводим итоги

• Взаимодействие, свойственное всем телам во Вселенной и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу, называют гравитационным, а само явление взаимного притяжения тел — всемирным тяготением или гравитацией.

• Закон всемирного тяготения: любые два тела притягиваются друг к другу с силой, которая прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .

• Силу, характеризующую гравитационное взаимодействие тел с Землей (или с другим астрономическим телом), называют силой тяжести. Сила тяжести направлена вертикально вниз и приложена к центру тяжести тела. Модуль силы тяжести можно вычислить по формулам:  $F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}$ ;  $F_{\text{тяж}} = mg$ .

• Скорость  $v$ , которую надо придать объекту, чтобы он двигался вокруг планеты по круговой орбите, называют первой космической скоростью:  $v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$ .



### Контрольные вопросы

1. Приведите примеры гравитационного взаимодействия.
2. Докажите, что сила всемирного тяготения прямо пропорциональна произведению масс тел.
3. Сформулируйте и запишите закон всемирного тяготения.
4. Каков физический смысл гравитационной постоянной? Кто и как определил ее значение?
5. Каковы границы применимости закона всемирного тяготения?
6. Дайте определение силы тяжести и охарактеризуйте ее.
7. Как рассчитать ускорение свободного падения? От каких факторов оно зависит?
8. Почему тело, брошенное горизонтально, может так и не упасть на Землю?
9. Дайте определение первой космической скорости. Получите формулу для ее вычисления.



### Упражнение № 11

1. Вы придали телу у поверхности Земли скорость 8 км/с. Вернется ли тело к вам, облетев вокруг Земли? Обоснуйте свой ответ.
2. Оцените силу гравитационного взаимодействия между вами и соседкой или соседом по парте. Объясните, почему предлагается именно «оценить», а не «вычислить».
3. Как изменится сила притяжения между двумя шариками, если один из них заменить другим, в три раза большей массы? если в три раза увеличить расстояние между шариками?
4. Во сколько раз ускорение свободного падения на высоте  $6R_3$  меньше, чем на поверхности Земли?
5. Определите массу Солнца, считая, что орбита Земли является окружностью и что радиус земной орбиты равен  $1,5 \cdot 10^{11}$  м (1 астрономическая единица).
6. Вычислите период вращения и радиус круговой орбиты первого искусственного спутника Земли.
7. Узнайте о жизни и деятельности выдающегося украинского советского ученого в области ракетостроения и космонавтики С. П. Королева (см. [рисунок](#)).

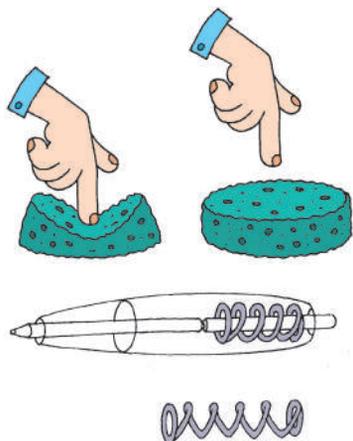


Сергей Королев (справа) и первая в мире женщина-космонавт Валентина Терешкова, 1963 г.

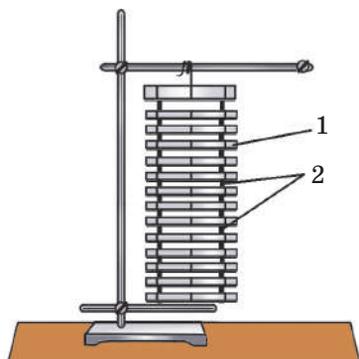
## § 12. СИЛА УПРУГОСТИ. ВЕС ТЕЛА



Первый в мире космонавт Ю. А. Гагарин вспоминал: «Я почувствовал, что какая-то непреодолимая сила все больше вжимает меня в кресло. И хотя оно было расположено так, чтобы минимизировать влияние гигантского веса, который навалился на мое тело, было трудно пошевелить рукой и ногой». О том, как и почему возникают перегрузки, при каких условиях тело находится в состоянии невесомости, вы узнаете из этого параграфа.



**Рис. 12.1.** После прекращения действия силы упругие тела восстанавливают свои форму и размеры



**Рис. 12.2.** Механическая модель твердого тела: параллельные пластины (1), имитирующие слои молекул, соединены пружинами (2), имитирующими взаимодействия между молекулами

### 1 Вспоминаем о деформации

Нажмем на кнопку авторучки — пружина в корпусе сожмется, и ее длина уменьшится; помнем в руке кусочек пластилина — изменится его форма; надавим пальцем на губку — одновременно изменятся и форма, и размеры губки.

Изменение формы и (или) размеров тела называют **деформацией**.

Если прекратить сжимать пружину, давить на губку, то есть устранить действие внешних сил, и пружина, и губка полностью восстановят свои форму и размеры, то есть перестанут быть деформированными (рис. 12.1). А вот форма кусочка пластилина не восстановится — пластилин ее «не помнит» и останется деформированным.

Деформации, которые полностью исчезают после прекращения действия на тело внешних сил, называют **упругими**; деформации, которые сохраняются, называют **пластическими**.

Причина возникновения и упругой, и пластической деформаций в том, что под действием сил, приложенных к телу, его различные части смещаются относительно друг друга. По характеру смещения частей различают *деформации сжатия, растяжения, сдвига, изгиба, кручения*. Остановимся на упругой деформации сжатия и растяжения. Для этого воспользуемся механической моделью твердого тела (рис. 12.2).

Нажмем на модель твердого тела сверху рукой: верхние пластины начнут смещаться вниз, нижние же останутся почти неподвижными, и в результате модель изменит

размеры — деформируется. Примерно так же при сдавливании твердого тела смещаются в направлении действия силы слои его молекул, в результате чего размеры тела уменьшаются. Такую деформацию называют *деформацией сжатия* — ее испытывают ножки столов и стульев, фундаменты домов и т. п. (см. рис. 12.3, а).

Если же тело растягивать, слои молекул раздвинутся и тело также изменит свои размеры. Такую деформацию называют *деформацией растяжения* — ее испытывают тросы, цепи в подъемных устройствах, стяжки между вагонами и т. д. (см. рис. 12.3, б).

Физическую величину, равную изменению длины тела при деформации растяжения или сжатия, называют **удлинением**  $\Delta l$  (или  $x$ ):

$$\Delta l = l - l_0,$$

где  $l$  — длина деформированного тела;  $l_0$  — начальная длина тела (рис. 12.4).

## 2 Когда возникает сила упругости

Если вы сгибаете ветку дерева, сжимаете эспандер, натягиваете тетиву лука, то есть деформируете эти тела, вы чувствуете их сопротивление: со стороны тел начинает действовать сила, стремящаяся восстановить то состояние тела, в котором тело находилось до деформации. Эту силу называют *силой упругости* (рис. 12.5).

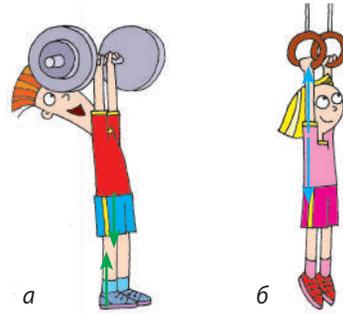
**Сила упругости**  $\vec{F}_{\text{упр}}$  — это сила, которая возникает при деформации тела и стремится вернуть тело в недеформированное состояние.

Изучая деформацию тонких длинных стержней, английский естествоиспытатель *Роберт Гук* (1635–1703) установил закон, позже получивший название **закон Гука**:

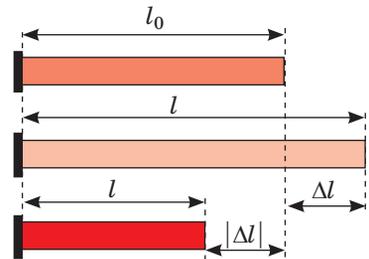
При малых упругих деформациях растяжения или сжатия сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела:

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\vec{x}$$

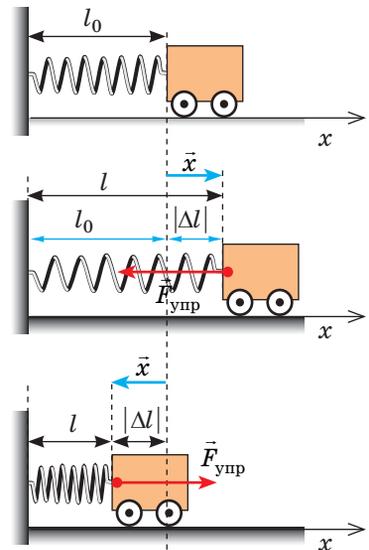
Знак « $-$ » показывает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную удлинению.



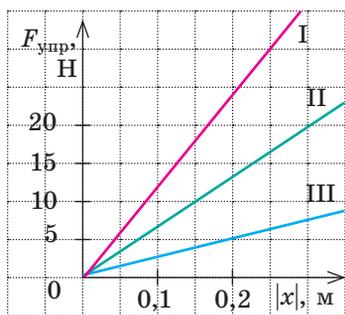
**Рис. 12.3.** Кости, мышцы, связки человека подвергаются деформации сжатия (а), и деформации растяжения (б)



**Рис. 12.4.** Деформации сжатия и растяжения стержня;  $\Delta l$  — удлинение стержня



**Рис. 12.5.** Сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$  всегда стремится вернуть тело в недеформированное состояние. Здесь  $\vec{x}$  — вектор удлинения



**Рис. 12.6.** При малых упругих деформациях график зависимости силы упругости от модуля удлинения тела — прямая

Закон Гука можно записать и для модулей:

$$F_{\text{упр}} = k|x| = k|\Delta l|,$$

где  $x = \Delta l$  — удлинение.

Поскольку сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела, график зависимости  $F_{\text{упр}}(|x|)$  — прямая (рис. 12.6).

Коэффициент пропорциональности  $k$  называют **жесткостью** тела (стержня, балки, шнура, пружины\*). Жесткость тела можно определить, воспользовавшись законом Гука:

$$F_{\text{упр}} = k|x| \Rightarrow k = \frac{F_{\text{упр}}}{|x|}.$$

*Единица жесткости в СИ — ньютон на метр:*  $[k] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$ .

- **Жесткость** — это характеристика тела, поэтому она не зависит ни от силы упругости, ни от удлинения тела.
- **Жесткость зависит от упругих свойств материала**, из которого изготовлено тело; от *формы* тела и его *размеров* (см. § 35).

**?** По графикам (рис. 12.6) найдите жесткости тел I–III. Можете ли вы, не выполняя расчетов, определить, какое тело имеет наибольшую жесткость?

### 3 Какова природа силы упругости

Известно, что все тела состоят из атомов (молекул, ионов), а те, в свою очередь, — из ядра, имеющего положительный заряд, и электронного облака, заряд которого отрицательный. Между заряженными составляющими частиц вещества существуют силы электромагнитного притяжения и отталкивания.

Если тело не деформировано, силы притяжения равны силам отталкивания. При деформации взаимное расположение частиц в теле изменяется. Если расстояние между частицами увеличивается, то электромагнитные силы притяжения становятся больше, чем силы отталкивания, и частицы начинают притягиваться друг к другу. Если расстояние между частицами уменьшается, то больше становятся силы отталкивания. Другими словами, частицы вещества «стремятся» вернуться к состоянию равновесия. Таким образом, *сила упругости — результат электромагнитного взаимодействия частиц вещества*.

### 4 Некоторые виды сил упругости. Вес тела

Обычно силу упругости обозначают символом  $\vec{F}_{\text{упр}}$ . Однако есть силы упругости, для обозначения которых используются отдельные символы.

Если тело расположено на опоре, то опора деформируется (прогибается). Деформация опоры вызывает появление силы упругости, действующей

\* Проволока, из которой изготовлена пружина, испытывает деформацию кручения, однако сила упругости, возникающая при растяжении и сжатии пружины, «подчиняется» закону Гука.

на тело *перпендикулярно поверхности опоры*. Эту силу называют **силой нормальной реакции опоры** и обозначают символом  $\vec{N}$  (рис. 12.7).

Если тело закрепить на подвесе (нити, жгуте, шнуре), то подвес деформируется (растягивается) и будет действовать на тело с определенной силой упругости, направленной *вдоль подвеса*, — **силой натяжения подвеса**  $\vec{T}$  (рис. 12.8).

Все тела вследствие гравитационного притяжения сдавливают или прогибают опору либо растягивают подвес. Силу, характеризующую такое действие тел, называют **весом** и обозначают символом  $\vec{P}$ .

На рис. 12.9, 12.10 показано, как возникает эта сила, если тело находится вблизи поверхности Земли и действует на *горизонтальную опору или вертикальный подвес*. В таких случаях согласно третьему закону Ньютона вес тела по модулю равен силе нормальной реакции опоры или силе натяжения подвеса и направлен противоположно им:  $\vec{P} = -\vec{N}$ ;  $\vec{P} = -\vec{T}$ . Именно такие случаи возникновения веса тела мы будем рассматривать далее.

*Обратите внимание!* Если тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, то вес тела по модулю равен силе тяжести ( $\vec{P} = m\vec{g}$ ) и совпадает с ней по направлению. Действительно, в таком случае сила тяжести и сила нормальной реакции опоры (или сила натяжения подвеса) скомпенсированы, поэтому они равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{N} = -m\vec{g}$  ( $\vec{T} = -m\vec{g}$ ); так как  $\vec{P} = -\vec{N}$  ( $\vec{P} = -\vec{T}$ ), получим:  $\vec{P} = m\vec{g}$ . Но, в отличие от силы тяжести, которая приложена к телу, *вес приложен к опоре или подвесу*.

Вес тела и сила тяжести различаются и по своей природе: *сила тяжести — это гравитационная сила, а природа веса тела — электромагнитная*.

**5 При каких условиях вес тела изменяется**

Нам кажется, что в невесомости находятся только космонавты на орбите, а перегрузки испытывают только летчики при выполнении фигур высшего пилотажа и космонавты. Но это не так.

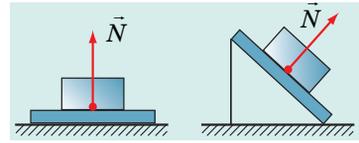


Рис. 12.7. Сила нормальной реакции опоры направлена перпендикулярно поверхности опоры

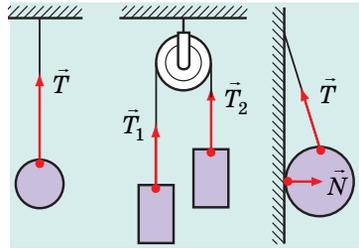


Рис. 12.8. Сила натяжения подвеса направлена вдоль подвеса

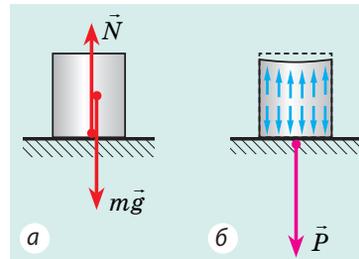


Рис. 12.9. Сила тяжести и сила реакции опоры вызывают деформацию сжатия (а). Тело, стремясь вернуться в недеформированное состояние, давит на опору с силой упругости  $\vec{P}$  (б)

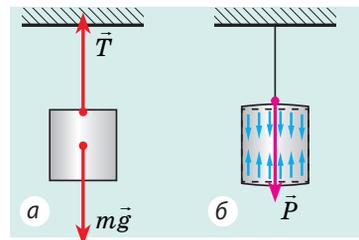
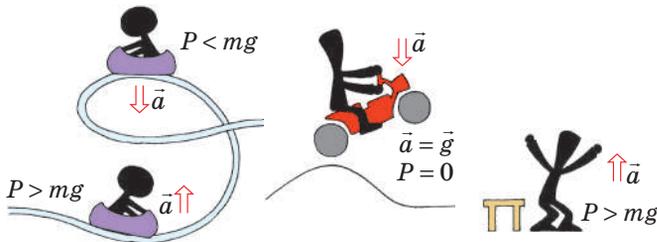
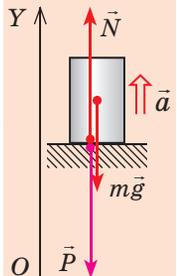
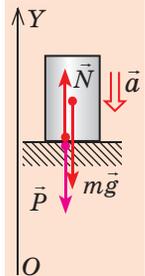


Рис. 12.10. Силы тяжести и сила натяжения подвеса вызывают деформацию растяжения (а). Тело, стремясь вернуться в недеформированное состояние, растягивает подвес с силой упругости  $\vec{P}$  (б)

**?** Рассмотрите рис. 12.11. Куда направлено ускорение движения тела, когда тело испытывает перегрузки? ощущает уменьшение веса? Чему равно ускорение, когда тело находится в состоянии невесомости?



**Рис. 12.11.** Все мы время от времени испытываем перегрузки ( $P > mg$ ), ощущаем уменьшение веса ( $P < mg$ ) или находимся в состоянии невесомости ( $P = 0$ )

Увеличение веса (перегрузка)	Уменьшение веса
<p>Рассмотрим тело, которое находится на опоре и вместе с ней движется в гравитационном поле Земли с ускорением <math>\vec{a}</math>. На тело действуют две силы: сила тяжести <math>m\vec{g}</math> и сила нормальной реакции опоры <math>\vec{N}</math>. Свяжем систему координат с Землей и направим ось <math>OY</math> вертикально вверх. Согласно второму закону Ньютона: <math>m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}</math>. Запишем это уравнение в проекциях на ось <math>OY</math> для двух случаев.</p>	
<p>1. Ускорение направлено вертикально вверх</p> <p><math>OY: -mg + N = ma \Rightarrow</math>  <math>\Rightarrow N = mg + ma = m(g + a)</math>.                      Согласно третьему закону Ньютона <math>P = N</math>.                      Окончательно получим:  <math>P = m(g + a)</math>.</p> 	<p>2. Ускорение направлено вертикально вниз</p> <p><math>OY: -mg + N = -ma \Rightarrow</math>  <math>\Rightarrow N = mg - ma = m(g - a)</math>.                      Согласно третьему закону Ньютона <math>P = N</math>.                      Окончательно получим:  <math>P = m(g - a)</math>.</p> 
<p>Вес тела, которое движется с ускорением, направленным вертикально вверх, больше, чем вес этого же тела в состоянии покоя. Когда есть перегрузки, не только тело сильнее давит на опору, но и части тела сильнее давят друг на друга.</p>	<p>Вес тела, которое движется с ускорением, направленным вертикально вниз, меньше, чем вес этого же тела в состоянии покоя. Если в этом случае ускорение движения тела равно ускорению свободного падения (<math>\vec{a} = \vec{g}</math>), вес тела равен нулю.</p>

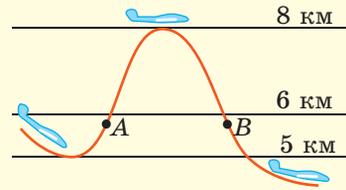
## 6 Как испытать состояние невесомости

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

В состоянии невесомости на тело действует только сила тяжести (тело свободно падает), и наоборот: *если тело движется только под действием силы тяжести, оно находится в состоянии невесомости.*

В состоянии невесомости тело не давит на опору и части тела не давят друг на друга; космонавт на орбите (вспомните: на орбите космический корабль движется только под действием силы тяжести) не чувствует своего веса, предмет, выпущенный из его рук, не падает. Дело в том, что сила тяжести сообщает каждому телу и любой части тела одинаковое ускорение.

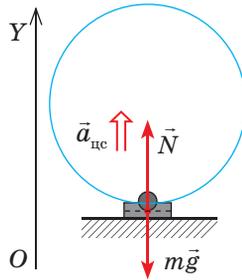
Чтобы испытать состояние невесомости, достаточно подпрыгнуть. А вот для тренировки космонавтов используют тот факт, что из-за действия силы тяжести траектория тела, брошенного под углом к горизонту, — параболическая. Если в верхних слоях атмосферы самолет направить по восходящей траектории («бросить» под углом к горизонту) и существенно уменьшить тягу двигателей, то некоторое время все тела в самолете будут находиться в состоянии невесомости.



**7 Учимся решать задачи**

**Задача.** Самолет делает «мертвую петлю», описывая в вертикальной плоскости окружность радиусом 250 м. Во сколько раз вес летчика в нижней части траектории больше силы тяжести, если скорость движения самолета 100 м/с?

*Анализ физической проблемы.* Самолет движется по окружности, а значит, летчик имеет центростремительное ускорение. На пояснительном рисунке изобразим силы, действующие на летчика, и направление его ускорения. Выберем одномерную систему координат, которую свяжем с точкой на поверхности Земли, ось  $OY$  направим вертикально вверх.



*Дано:*  
 $r = 250 \text{ м}$   
 $v = 100 \text{ м/с}$   
 $g = 10 \text{ м/с}^2$

$\frac{P}{F_{\text{тяж}}}$  — ?

*Решение.* По второму закону Ньютона:  $m\vec{a}_{\text{цс}} = m\vec{g} + \vec{N}$ .

В проекциях на ось  $OY$ :  
 $-mg + N = ma_{\text{цс}} \Rightarrow N = m(a_{\text{цс}} + g)$ .

По третьему закону Ньютона  $P = N$ , поэтому  $P = m(a_{\text{цс}} + g)$ . Окончательно:

$$\frac{P}{F_{\text{тяж}}} = \frac{m(a_{\text{цс}} + g)}{mg} = \frac{a_{\text{цс}} + g}{g}, \text{ где } a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}.$$

Найдем значения искомых величин:

$$[a_{\text{цс}}] = \frac{(\text{м/с})^2}{\text{м}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad a_{\text{цс}} = \frac{100^2}{250} = 40 \text{ (м/с}^2\text{)};$$

$$\frac{P}{F_{\text{тяж}}} = \frac{40 \text{ м/с}^2 + 10 \text{ м/с}^2}{10 \text{ м/с}^2} = 5.$$

*Анализ результата.* Вес летчика в 5 раз больше силы тяжести — это реальный результат.

*Ответ:*  $P/F_{\text{тяж}} = 5$ .

**Алгоритм решения задач на движение тела под действием нескольких сил**

1. Прочитайте условие задачи. Выясните, какие силы действуют на тело, движется тело с ускорением или равномерно прямолинейно.

2. Запишите краткое условие задачи. При необходимости переведите значения физических величин в единицы СИ.

3. Выполните рисунок, на котором укажите силы, действующие на тело, и направление ускорения движения тела.

4. Выберите инерциальную СО. Количество осей координат и их направление выберите, исходя из условия задачи.

5. Запишите уравнение второго закона Ньютона в векторном виде и в проекциях на ось координат. Запишите формулы для вычисления сил. Получив систему уравнений, решите ее. Если в задаче есть дополнительные условия, используйте их.

6. Проверьте единицу, найдите числовое значение искомой величины

7. Проанализируйте результат. Запишите ответ.



### Подводим итоги

• Деформацией называют изменение формы или (и) размеров тела. Если после прекращения действия на тело внешних сил деформация полностью исчезает, это упругая деформация; если деформация сохраняется, это пластическая деформация.

• Силу, которая возникает в теле при его деформации и стремится вернуть тело в недеформированное состояние, называют силой упругости. Сила упругости имеет электромагнитную природу, ее можно рассчитать по закону Гука:  $\vec{F}_{\text{упр}} = -k\vec{x}$ , где  $k$  — жесткость тела. Закон Гука выполняется только при малых упругих деформациях.

• Вес тела  $\vec{P}$  — это сила, с которой вследствие гравитационного притяжения тело давит на опору или растягивает подвес. Если опора горизонтальная или подвес вертикальный, согласно третьему закону Ньютона вес тела равен по модулю и противоположен по направлению силе нормальной реакции опоры (силе натяжения подвеса):  $\vec{P} = -\vec{N}$  ( $\vec{P} = -\vec{T}$ ).

♦ Если тело находится в состоянии покоя или движется равномерно прямолинейно, вес тела по модулю равен силе тяжести:  $P = mg$ .

♦ Если тело движется с ускорением, направленным вертикально вверх, это тело испытывает перегрузки (вес тела больше, чем его вес в состоянии покоя):  $P = m(g + a)$ .

♦ Если тело движется с ускорением, направленным вертикально вниз, вес тела меньше, чем его вес в состоянии покоя:  $P = m(g - a)$ .



### Контрольные вопросы

1. Что такое деформация? В чем причина ее возникновения? 2. Какие виды деформаций вы знаете? Какие деформации называют упругими? пластическими? Приведите примеры. 3. Дайте определение силы упругости. Какова ее природа? 4. Сформулируйте закон Гука. Каковы границы его применимости? 5. От чего зависит жесткость тела? Какова единица жесткости в СИ? 6. Какую силу называют силой нормальной реакции опоры? силой натяжения подвеса? Как направлены эти силы? Приведите примеры. 7. Что такое вес? Чем вес тела отличается от силы тяжести? 8. Объясните причину возникновения веса тела. 9. Что такое невесомость? При каких условиях тело находится в состоянии невесомости? 10. При каких условиях тело испытывает перегрузки?

### Физика в цифрах

- $P=0$  — отсутствие нагрузки (состояние невесомости).
- $P=mg$  — «нормальная» нагрузка (на поверхности Земли).
- $P=3mg$  — максимальная нагрузка, которая ощущается на «американских горках».
- $P=4,3mg$  — максимальная нагрузка, на которую рассчитаны пассажирские самолеты.
- $P=5mg$  — нагрузка, при которой большинство людей теряют сознание.
- $P=9mg$  — нагрузка, которую может испытывать человек за штурвалом истребителя при крутых виражах.



### Упражнение № 12

1. На сколько удлинится резиновый шнур под действием силы 5 Н, если жесткость шнура 25 Н/м?
2. На рис. 1 представлена траектория движения автомобиля. В какой точке траектории вес водителя равен силе тяжести? В какой точке водитель чувствует перегрузки, а в какой — уменьшение веса?
3. Под действием груза массой 10 кг проволока удлинилась на 1 мм. Какова жесткость проволоки?
4. В лифте установлен динамометр, на котором подвешено тело массой 1 кг. Что показывает динамометр, когда ускорение лифта: а) равно нулю; б) равно 5 м/с<sup>2</sup> и направлено вертикально вниз; в) равно 5 м/с<sup>2</sup> и направлено вертикально вверх?
5. Определите вес автомобиля в точках *Б* и *В* (см. рис. 1), если он движется со скоростью 54 км/ч, а его масса равна 2 т. С какой скоростью должен двигаться автомобиль, чтобы в точке *Б* оказаться в состоянии невесомости?

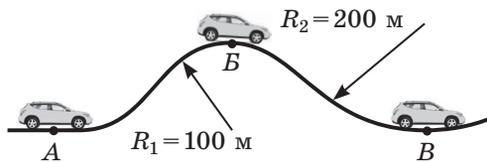


Рис. 1

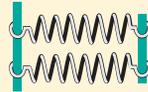
6. Ведерко с водой вращают в вертикальной плоскости на веревке длиной 1 м. С какой наименьшей скоростью нужно вращать ведерко, чтобы в момент прохождения верхней точки вода из него не выливалась?
7. Ракета-носитель с космическим кораблем стартует с поверхности Земли, имея ускорение 30 м/с<sup>2</sup>. Определите при этом вес космонавта на борту корабля, если его масса 75 кг. Почему кресло космонавтов при взлете и посадке располагают так, чтобы ускорение было направлено перпендикулярно к туловищу космонавта, а не вдоль него?
8. Докажите, что жесткость  $k$  системы двух пружин жесткостью  $k_1$  и  $k_2$  можно рассчитать по формулам, представленным на рис. 2.
9. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и выясните, как влияет на здоровье и состояние человека значительная перегрузка; длительное пребывание в состоянии невесомости.
10. В начале § 7 речь шла о цирковом номере «Человек — пушечное ядро». Какую нагрузку испытывает спортсмен во время выстрела? Необходимые данные найдите в дополнительных источниках информации.
11. Когда возникает сила трения? Всегда ли эта сила мешает движению тела?

#### Соединение пружин



$$\frac{1}{k_{\text{посл}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$$

#### Параллельное



$$k_{\text{пар}} = k_1 + k_2$$

Рис. 2



### Экспериментальное задание

Жесткость тела существенно зависит от его формы. Докажите это, использовав несколько одинаковых полосок бумаги, две книги и небольшой груз. Придайте полоскам различную форму (см., например, рис. 3) и исследуйте их деформацию вследствие действия одинаковой силы.

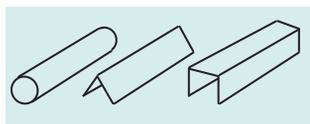


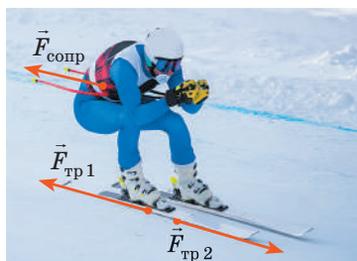
Рис. 3



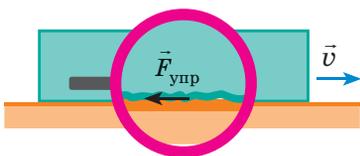
## § 13. СИЛА ТРЕНИЯ



Почему профили самолетов и подводных лодок напоминают контуры тела дельфина? Почему зимой автомобили «переобувают» в шипованную резину? Почему трудно двигаться в гололед? Как «падает» парашютист? Как уменьшить силу трения? А может, ее не стоит уменьшать, а наоборот, нужно увеличивать? Что будет, если трение исчезнет вообще?



**Рис. 13.1.** Относительно поверхности снега и относительно воздуха лыжник движется вправо, поэтому сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}1}$  и сила сопротивления  $\vec{F}_{\text{сопр}}$ , действующие на лыжника, направлены влево. Снег относительно лыжника движется влево, со стороны лыжника на снег действует сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}2}$ , направленная вправо



**Рис. 13.2.** Один из механизмов возникновения сухого трения связан с наличием неровностей на поверхностях соприкасающихся тел

### 1 Вспоминаем силу трения

При любом движении тело обязательно контактирует с микро- или макротелами вокруг (поверхностью другого тела, частицами жидкости или газа, внутри которых тело движется, и т. д.). При таком контакте возникают силы, замедляющие движение тела, — *силы трения*.

**Сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$**  — это сила, возникающая при движении или попытке движения одного тела по поверхности другого либо при движении тела внутри жидкой или газообразной среды.

*Сила трения всегда направлена вдоль поверхности соприкасающихся тел и противоположно направлению скорости их относительного движения (рис. 13.1).*

Трение между поверхностью твердого тела и окружающей жидкой или газообразной средой называют *сопротивлением среды* или *жидким (вязким) трением*. Трение между поверхностями двух соприкасающихся твердых тел называют *сухим трением*.

### 2 Почему возникает сила сухого трения

Если рассмотреть поверхность любого тела в лупу, можно увидеть множество мелких неровностей. Когда одно тело скользит или пытается скользить по поверхности другого, неровности цепляются друг за друга и *деформируются*. Возникают *силы упругости*, направленные в сторону, противоположную деформации (рис. 13.2). Это одна из причин возникновения силы сухого трения.

Есть и другие причины. Так, в некоторых местах выступы тел плотно прижаты друг

к другу — расстояние между ними настолько мало, что действуют силы межмолекулярного притяжения, в результате чего выступы оказываются как бы «склеенными». Понятно, что такое «склеивание» происходит в ходе всего движения и препятствует ему.

И сила упругости, и сила межмолекулярного притяжения имеют электромагнитное происхождение, поэтому *природа силы сухого трения — электромагнитная.*

**?** На рис. 13.3 найдите минимум два примера, когда изменяют силу сухого трения, увеличивая или уменьшая неровности поверхностей.



Рис. 13.3. К заданию в § 13

### 3 Какие существуют виды сухого трения

Различают три вида сухого трения: *трение покоя, трение скольжения, трение качения.*

Если вы попытаетесь, прикладывая небольшую силу, сдвинуть с места санки с тяжелым грузом, они не сдвинутся, поскольку возникнет *сила трения покоя*, которая уравнивает прилагаемую внешнюю силу.

**Сила трения покоя**  $\vec{F}_{\text{тр.п}}$  — это сила трения, возникающая между соприкасающимися поверхностями двух тел и препятствующая возникновению их относительного движения.

*Сила трения покоя всегда равна по модулю и противоположна по направлению равнодействующей внешних сил  $\vec{F}_{\text{внеш}}$ , которая пытается сдвинуть тело с места (рис. 13.4):*

$$\vec{F}_{\text{тр.п}} = -\vec{F}_{\text{внеш}}$$

Чем большая сила будет приложена, тем больше будет сила трения покоя. Наконец при определенном значении равнодействующей внешних сил (а следовательно, и силы трения покоя) тело сдвинется с места. То есть *сила трения покоя имеет некоторое максимальное значение.*

Чаще всего действие силы трения покоя «полезно»: благодаря ей вещи не выскальзывают из рук, грифель карандаша оставляет след на бумаге; эта сила позволяет выполнять повороты, удерживает корни растений в почве. Благодаря силе трения покоя передвигаются люди, животные, транспорт (рис. 13.5).

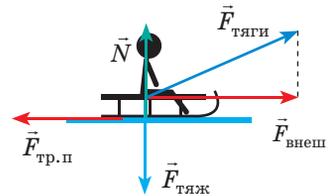
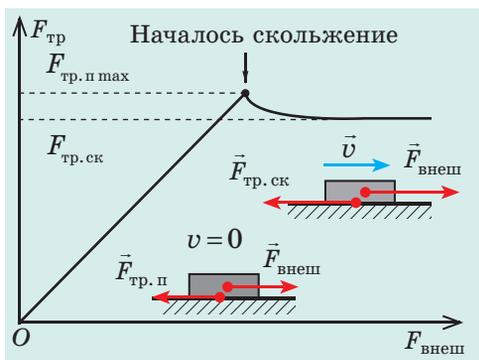


Рис. 13.4. Внешние силы пытаются сдвинуть тело. Сила трения покоя, возникающая при этом, уравнивает внешние силы, и тело находится в состоянии покоя



Рис. 13.5. Шины автомобиля в момент соприкосновения с поверхностью дороги по сути пытаются осуществить движение назад. В результате возникает сила трения покоя, направленная вперед, — движущая сила



**Рис. 13.6.** Когда сила трения покоя достигает максимального значения, тело трогается с места (начинает скольжение)

**Сила трения скольжения**  $\vec{F}_{\text{тр.ск}}$  — это сила, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого и направленная в сторону, противоположную направлению относительной скорости движения тел.

Сила трения скольжения действует вдоль поверхности соприкосновения тел, и она немного меньше максимальной силы трения покоя (рис. 13.6). Именно поэтому тела сдвигаются с места рывком и сдвинуть их труднее, чем затем перемещать. Это особенно заметно, когда тела массивные.

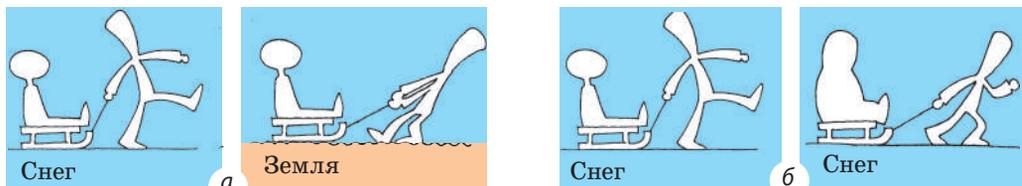
Ваш жизненный опыт показывает, что сила трения скольжения зависит от свойств соприкасающихся поверхностей и увеличивается с увеличением силы нормальной реакции опоры (рис. 13.7). Закон, отражающий зависимость  $F_{\text{тр.ск}}(N)$ , был экспериментально установлен французским ученым Г. Амонтоном (1663–1705) и проверен его соотечественником Ш. Кулоном (1736–1806), поэтому называется **закон Амонтона — Кулона**:

Сила трения скольжения не зависит от площади соприкосновения тел и прямо пропорциональна силе  $N$  нормальной реакции опоры:

$$F_{\text{тр.ск}} = \mu N$$

Здесь  $\mu$  — **коэффициент трения скольжения**, который зависит от материалов и качества обработки соприкасающихся поверхностей, незначительно зависит от относительной скорости движения соприкасающихся поверхностей и является безразмерной величиной:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр.ск}}}{N}; [\mu] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Н}} = 1.$$



**Рис. 13.7.** Сила трения скольжения зависит от качества и рода поверхностей (а) и увеличивается с увеличением силы нормальной реакции опоры (б)

В технике, на транспорте, в быту часто принимают меры для увеличения максимальной силы трения покоя: на ступеньки и обувь наклеивают противоскользящие накладки, автомобили «переобувают» в зимние шины и т. д.

**?** Приведите еще несколько подобных примеров.

После того как равнодействующая внешних сил становится равной максимальной силе трения покоя, тело начинает скольжение, — и тогда говорят о *силе трения скольжения*.

Значения коэффициентов трения скольжения устанавливают исключительно экспериментально. Обычно таблицы коэффициентов трения скольжения содержат ориентировочные средние значения для пар материалов (см. [таблицу](#)).

Силу трения скольжения можно уменьшить, смазав соприкасающиеся поверхности. Твердая смазка изменяет качество поверхности; жидкая смазка отдаляет соприкасающиеся поверхности друг от друга — сухое трение заменяется значительно более слабым жидким трением.

Трение существенно уменьшится, если между соприкасающимися поверхностями расположить твердые катки, то есть скольжение заменить качением. Опыты показывают, что *при одинаковых условиях сила трения качения в десятки раз меньше, чем сила трения скольжения*.

Одна из причин возникновения силы трения качения заключается в том, что поверхность, по которой движется шарообразное тело (цилиндр, колесо, шар), деформируется, поэтому тело все время словно закатывается на небольшую наклонную плоскость ([рис. 13.8](#)). Чем больше деформация поверхности, тем больше угол наклона плоскости и тем больше сила трения качения. Именно поэтому *сила трения качения*:

- уменьшается с увеличением твердости поверхности, по которой катится тело, и твердости материала, из которого изготовлено тело;
- увеличивается с увеличением давления тела на поверхность;
- уменьшается с увеличением радиуса тела.

## 4

## Сила сопротивления среды

**Сила сопротивления среды (сила вязкого трения)**  $\vec{F}_{\text{сопр}}$  — сила, возникающая при движении тела внутри жидкости или газа.

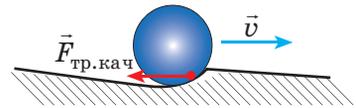
Рассмотрим *причины возникновения силы сопротивления среды*.

1. *Ламинарное обтекание*. Если твердое тело движется внутри жидкости или газа, то прилегающие слои среды движутся вместе с телом ([рис. 13.9](#)). Чем больше вязкость среды, тем больше ее слоев вовлекаются в движение.

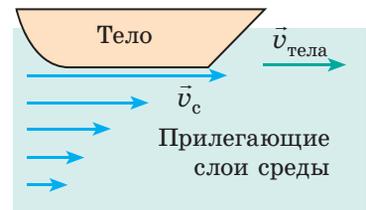
2. *Лобовое сопротивление*. Частицы среды сталкиваются с телом и замедляют его движение.

3. *Вихревое обтекание*. Если тело движется с большой скоростью, то ламинарное обтекание переходит в вихревое: непосредственно за телом

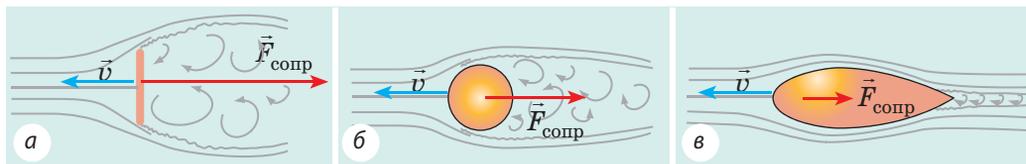
Материалы	Коэффициент трения скольжения
Сталь по льду	0,02
Сталь по стали	0,15
Бронза по бронзе	0,20
Дерево по дереву	0,25
Бумага (картон) по дереву	0,40
Резина по бетону	0,75



**Рис. 13.8.** Поверхность, по которой катится тело, деформируется, и это одна из причин возникновения силы трения качения



**Рис. 13.9.** Скорость движения прилегающих к телу слоев среды ( $v_c$ ) по мере удаления от тела постепенно уменьшается до нуля



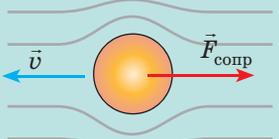
**Рис. 13.10.** При одинаковых условиях наибольшая сила сопротивления действует на шайбу (а), наименьшая — на тело каплевидной (обтекаемой) формы (в)

образуется зона пониженного давления, и тело как бы втягивается в эту зону, замедляя свое движение.

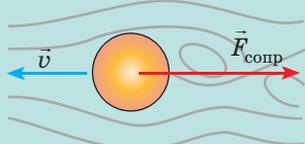
Сила сопротивления среды существенно зависит от формы тела (рис. 13.10). Сила сопротивления среды увеличивается:

1) с увеличением скорости  $v$  движения тела; при этом:

- если  $v < v_k$ , то  $F_{сопр} \sim v$



- если  $v > v_k$ , то  $F_{сопр} \sim v^2$



$v_k$  — критическая скорость — скорость движения тела, при которой ламинарное обтекание переходит в вихревое

2) с увеличением площади поперечного сечения тела.

Например, при падении парашютист набирает значительную скорость, однако сразу после раскрытия парашюта сила сопротивления воздуха резко увеличивается и парашютист начинает тормозить



3) с увеличением плотности и вязкости среды, при некоторых изменениях качества поверхности:

- увеличение плотности среды увеличивает лобовое сопротивление;
- увеличение вязкости среды и некоторые неровности поверхности тела способствуют вовлечению в движение большего количества прилегающих слоев среды



**Рис. 13.11.** К заданию в § 13

- ❓ Акулы, дельфины, рыбы могут двигаться достаточно быстро. Какие особенности конфигурации их головы, особенности формы и поверхности их тел этому способствуют?

**Обратите внимание!** Не существует силы жидкого трения покоя. То есть если тело, расположенное в жидкой или газообразной среде, находится в состоянии покоя относительно среды, то сила сопротивления среды на него не действует.

- ❓ А почему же тогда могут парить аисты, плыны, даже белки (рис. 13.11)? Какая сила компенсирует силу тяжести?

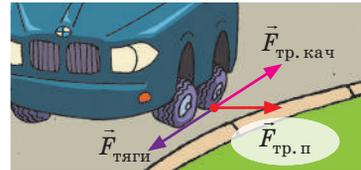
## 5 Учимся решать задачи

**Задача.** На горизонтальной дороге автомобиль выполняет поворот радиусом 45 м. Какую наибольшую скорость может иметь автомобиль, чтобы «вписаться» в поворот, если коэффициент трения скольжения шин об асфальт  $\mu = 0,5$ ?

*Анализ физической проблемы.* Автомобиль «не впишется» в поворот, если  $\vec{F}_{\text{тр.п}}$ , направленная к центру окружности, достигнет максимального значения и «перейдет» в силу трения скольжения.

*Обратите внимание:* кроме силы трения покоя, направленной к центру окружности и препятствующей боковому скольжению автомобиля, существует еще сила трения покоя, препятствующая проскальзыванию колес вдоль направления движения автомобиля, — она и является силой тяги автомобиля (рис. 13.12).

Выполним пояснительный рисунок, указав силы, действующие на автомобиль, и направление ускорения его движения. Систему координат свяжем с телом на поверхности Земли.



**Рис. 13.12.** Силы трения, действующие на ведущее колесо автомобиля при повороте

Дано:  
 $r = 45$  м  
 $\mu = 0,5$   
 $g = 10$  м/с<sup>2</sup>

Поиск математической модели, решение.  
 Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{F}_{\text{тр.п}} = m\vec{a}_{\text{цс}}$$

$v_{\text{max}}$  — ?

Спроецируем уравнения на оси координат:

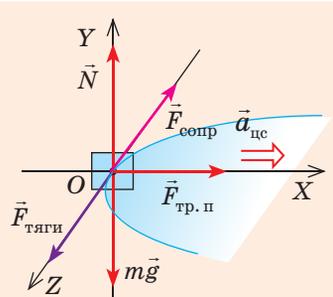
$$\begin{cases} OX: F_{\text{тр.п}} = ma_{\text{цс}}, \\ OY: N - mg = 0, \\ OZ: F_{\text{тяги}} - F_{\text{сопр}} = 0. \end{cases}$$

Поскольку  $F_{\text{тр.п max}} = \mu N = \mu mg$ ;  $a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}$ , то получим:  $\mu mg = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\mu gr}$ .

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[v] = \sqrt{\text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}} = \sqrt{\text{м}^2 / \text{с}^2} = \text{м} / \text{с}; \quad v = \sqrt{0,5 \cdot 45 \cdot 10} = 15 \text{ (м/с)}$$

Ответ:  $v_{\text{max}} = 15$  м/с.



## Подводим итоги

- Сила трения — это сила, возникающая при движении или попытке движения одного тела по поверхности другого, а также при движении тела внутри жидкой или газообразной среды. Сила трения всегда направлена вдоль поверхностей соприкасающихся тел и противоположно скорости их относительного движения.

- Различают силы трения покоя, трения скольжения, трения качения и сопротивления среды. Все эти силы, кроме силы трения качения, имеют электромагнитную природу.

- ♦ Сила трения покоя равна по модулю и противоположна по направлению равнодействующей внешних сил, действующих на тело:  $\vec{F}_{\text{тр.п}} = -\vec{F}_{\text{внеш}}$ .

♦ Сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормальной реакции опоры:  $F_{\text{тр.ск}} = \mu N$ . Коэффициент трения скольжения  $\mu$  зависит от материалов соприкасающихся поверхностей и качества их обработки.

♦ Сила трения качения прямо пропорциональна силе нормальной реакции опоры, намного меньше силы трения скольжения, зависит от радиуса тела, материала и твердости соприкасающихся поверхностей.

♦ Сила сопротивления среды существенно зависит от формы тела, увеличивается с увеличением скорости движения тела, площади его поперечного сечения, а также с увеличением вязкости и плотности среды.

### Контрольные вопросы



1. Дайте определение силы трения. 2. Какие виды трения вы знаете? 3. Каковы причины возникновения сухого трения? жидкого трения? 4. Почему силу трения покоя называют движущей силой? 5. Дайте определение силы трения скольжения. Как она направлена и по какой формуле ее вычисляют? 6. Как можно уменьшить (увеличить) силу трения? Приведите примеры. 7. От каких факторов зависит сила сопротивления среды? Приведите примеры.

### Упражнение № 13



1. Почему опасно ехать на автомобиле по мокрой или обледенелой дороге?
2. Почему, если машина забуксовала, под колеса подкладывают бревна?
3. Почему спринтерские дистанции преодолевают в шипованной обуви, а стайерские — в мягкой?
4. Вычислите тормозной путь и время торможения автомобиля, если перед торможением он двигался по прямому горизонтальному участку дороги со скоростью 72 км/ч. Коэффициент трения скольжения резины по бетону 0,8.
5. Упряжка собак начинает тянуть с постоянной силой 150 Н санки массой 100 кг. За какой интервал времени санки проедут первые 200 м пути? Считайте, что коэффициент трения скольжения полозьев по снегу равен 0,05.
6. Рабочий толкает вагонетку с силой, направленной вниз под углом  $45^\circ$  к горизонту. Какую наименьшую силу должен приложить рабочий, чтобы сдвинуть вагонетку с места, если ее масса 300 кг, а коэффициент сопротивления движению 0,01\*? Вагонетка стоит горизонтально.
7. Приведите примеры современных механизмов, приспособлений, транспортных средств, создавая которые, конструкторы «подсмотрели» в природе способы увеличения или уменьшения сил трения и сопротивления сред. При необходимости воспользуйтесь дополнительными источниками информации.

### Экспериментальное задание



Воспользовавшись подручными средствами (резиновый шнур, тела различных форм, пылесос, кусочек картона, сосуд с водой, металлический шарик и др.), проведите ряд простых опытов (см., например, рисунок) по выявлению факторов, от которых зависит сопротивление среды (либо сила сухого трения). Подготовьте фото- или видеоотчет.



\* Напомним: в подобных задачах используют коэффициент сопротивления движению ( $\mu$ ), учитывающий все виды трения (трение качения колес, трение скольжения в осях и т. п.). В таких задачах силу сопротивления  $\vec{F}_{\text{сопр}}$  вычисляют по формуле  $F_{\text{сопр}} = \mu N$ .

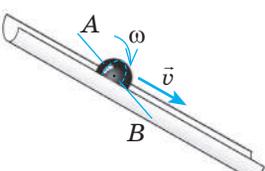


Представьте, что вам нужно достать книгу с верхней полки. Подставив стул, вы становитесь на него на цыпочках и... не удерживаете равновесия. А вот неваляшка всегда возвращается в вертикальное положение и никогда не теряет равновесия! Что такое равновесие и при каких условиях реальное тело (а не его модель — материальная точка) находится в равновесии?



### 1 Что такое равновесие тела

**Равновесие тела** — это сохранение состояния движения или состояния покоя тела с течением времени. Что значит *сохранение состояния движения*? Для начала определим *поступательное* и *вращательное* движения.

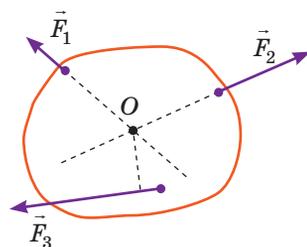
Поступательное движение	Вращательное движение
Движение тела, при котором все точки тела движутся одинаково.	Движение тела, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых расположены на одной прямой — <i>на оси вращения</i> .
 <p>Движение шарика по наклонному желобу <i>сложное</i> — его можно разложить на <i>два простых движения</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>вращательное</i> относительно оси <math>AB</math> с некоторой угловой скоростью <math>\omega</math>;</li> <li>• <i>поступательное</i> со скоростью <math>\vec{v}</math>, которая равна скорости движения точек шарика, лежащих на оси <math>AB</math>.</li> </ul> <p>Шарик <i>сохраняет состояние движения</i> — находится в <i>равновесии</i>, если скорости его поступательного и вращательного движений остаются <i>неизменными</i>.</p>	

### 2 Центр масс тела

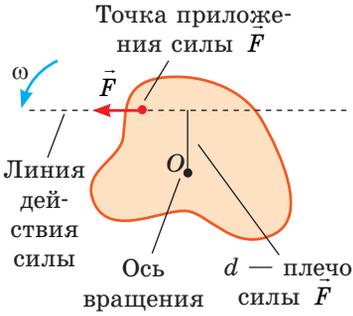
Если к неподвижному телу приложить некоторую силу, обычно тело начинает вращаться и одновременно двигаться поступательно. Но через некоторое время вращательное движение тела прекратится и тело будет двигаться только поступательно. Это произойдет тогда, когда линия действия силы пройдет через *центр масс тела*.

**Центр масс тела** — это точка пересечения прямых, вдоль которых направлены силы, каждая из которых вызывает только поступательное движение тела (рис. 14.1).

Если размеры тела гораздо меньше радиуса Земли, то *центр масс тела совпадает с центром тяжести*. Напомним: *центр тяжести симметричных фигур расположен в их геометрическом центре; центр тяжести треугольника — в точке*



**Рис. 14.1.** Силы  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  вызывают только поступательное движение тела, поскольку линии действия этих сил проходят через центр масс тела (точка  $O$ ). Сила  $\vec{F}_3$  кроме поступательного вызывает также вращательное движение тела



**Рис. 14.2.** Тело вращается против хода часовой стрелки относительно оси, проходящей через точку  $O$

пересечения его медиан. (О некоторых методах определения центра масс вы узнаете в ходе лабораторной работы № 4.)

### 3 Вспоминаем момент силы

**Момент силы  $M$**  — это физическая величина, которая равна произведению модуля силы  $F$ , действующей на тело, на плечо  $d$  этой силы:

$$M = Fd$$

**Единица момента силы в СИ — ньютон-метр:**  $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} (\text{Nm})$ .

**Плечо  $d$  силы  $F$**  — это наименьшее расстояние от оси вращения тела до линии, вдоль которой действует сила  $\vec{F}$  (рис. 14.2). На рисунке сила  $\vec{F}$  поворачивает тело против хода часовой стрелки — момент такой силы принято считать **положительным**. Если сила поворачивает (или пытается повернуть) тело по ходу часовой стрелки, момент такой силы принято считать **отрицательным**. Обычно на тело действуют несколько сил, моменты которых могут быть как положительными, так и отрицательными, а могут равняться нулю.

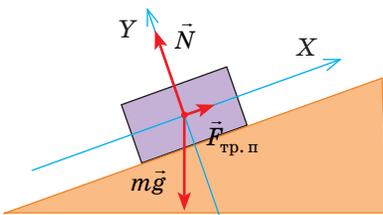
### 3 При каких условиях тело находится в равновесии

- Если тело может двигаться только поступательно (не может вращаться), то в соответствии с законом инерции такое тело находится в равновесии, если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$$

**Пример.** Расположенное на наклонной плоскости тело находится в состоянии равновесия, если действующие на него силы скомпенсированы:

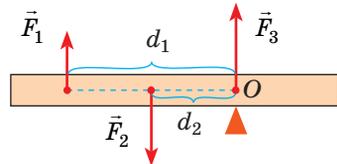
$$\vec{F}_{\text{тр.п}} + \vec{N} + m\vec{g} = 0.$$



- Если тело может только вращаться (имеет неподвижную ось вращения), то в соответствии с правилом моментов такое тело находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов сил, действующих на тело, равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$$

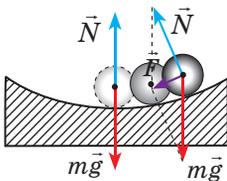
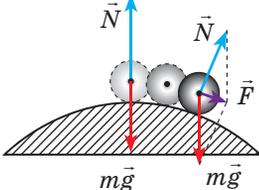
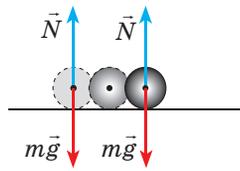
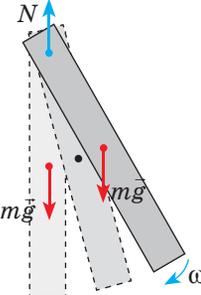
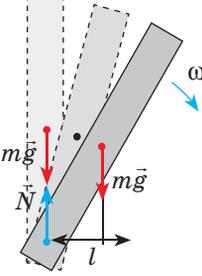
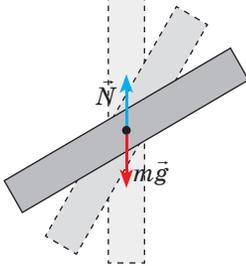
**Пример.** Рычаг находится в равновесии, если сумма моментов сил, действующих на него, равна нулю:  $M_1 + M_2 + M_3 = 0$ , где  $M_1 = -F_1d_1$ ,  $M_2 = F_2d_2$  (сила  $\vec{F}_1$  поворачивает рычаг по ходу часовой стрелки, сила  $\vec{F}_2$  — против хода часовой стрелки);  $M_3 = 0$  (поскольку  $d_3 = 0$ ).



- Если тело может двигаться поступательно, а также вращаться вокруг некоторой оси, то это тело будет находиться в равновесии, если соблюдены оба условия равновесия:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ ;  $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$ .

## 4 Какие существуют виды равновесия

### Виды равновесия тел

Устойчивое равновесие	Неустойчивое равновесие	Безразличное равновесие
<p>При малых отклонениях от положения равновесия тело произвольно возвращается в исходное положение.</p>  <p>Равнодействующая направлена к положению равновесия тела.</p>	<p>При малых отклонениях от положения равновесия тело еще больше отклоняется от исходного положения.</p>  <p>Равнодействующая направлена от положения равновесия тела.</p>	<p>При малых отклонениях от положения равновесия тело остается в своем новом положении.</p>  <p>Равнодействующая равна нулю.</p>
 <p>Сумма сил, приложенных к телу, равна нулю, но момент силы <math>m\vec{g}</math> возвращает тело в положение равновесия.</p>	 <p>Сумма сил равна нулю, однако момент силы <math>m\vec{g}</math> еще больше отклоняет тело от положения равновесия.</p>	 <p>Силы скомпенсированы, сумма моментов этих сил равна нулю.</p>

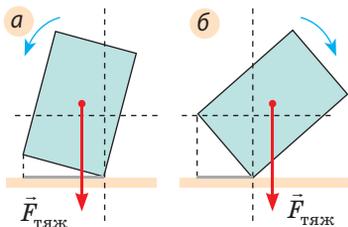
*Обратите внимание!* Тело, имеющее неподвижную ось вращения, будет находиться в состоянии *устойчивого равновесия*, если *центр тяжести тела расположен ниже точки опоры или подвеса*.

На практике мы часто имеем дело со случаями равновесия тел, опирающихся на несколько точек или на поверхность: человек опирается на ноги, стол и стул — на ножки, автомобиль — на колеса, дом — на фундамент и т. д. (рис. 14.3).

*Тело, опирающееся на горизонтальную плоскость, находится в состоянии устойчивого равновесия, если*



**Рис. 14.3.** Площадь опоры некоторых объектов (обозначена  $S$ )



**Рис. 14.4.** Если линия действия силы тяжести проходит в границах площади опоры, равновесие устойчивое (а), если вне площади опоры, равновесие нарушается — тело падает (б)

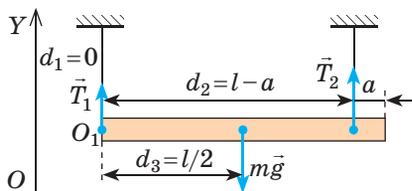
вертикальная линия, проведенная через центр тяжести тела, проходит в границах площади опоры (рис. 14.3, 14.4, а).

Очевидно: чем ниже расположен центр тяжести тела и чем больше площадь опоры тела, тем тело устойчивее. Именно поэтому фундаменты станков делают широкими и массивными, скоростные болиды имеют очень низкую посадку, человек или животное, чтобы принять устойчивое положение, расставляет и немного сгибает ноги (лапы). Чтобы увеличить площадь опоры, пожилой человек при ходьбе использует палку.

### 5 Учимся решать задачи

**Задача.** Однородный рельс длиной  $l = 10$  м и массой 900 кг поднимают на двух параллельных тросах. Определите силы натяжения тросов, если один закреплен на конце рельса, а второй — на расстоянии  $a = 1$  м от другого конца.

*Анализ физической проблемы.* Выполним пояснительный рисунок, где укажем силы, действующие на рельс (силы  $\vec{T}_1$  и  $\vec{T}_2$  натяжения тросов и силу тяжести  $m\vec{g}$ ). В качестве оси вращения выберем ось, проходящую, например, через точку  $O_1$  (эту точку можно выбрать произвольно), и укажем плечи сил:  $d_1 = 0$ ,  $d_2 = l - a$ ,  $d_3 = l/2$ .



Дано:  
 $l = 10$  м  
 $m = 900$  кг  
 $a = 1$  м

$T_1$  — ?  
 $T_2$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Запишем два условия равновесия тела: 
$$\begin{cases} \vec{T}_1 + \vec{T}_2 + m\vec{g} = 0, \\ M_1 + M_2 + M_3 = 0. \end{cases}$$

Здесь  $M_1 = 0$ , так как  $d_1 = 0$ ;  $M_2 = T_2(l - a)$  — сила  $\vec{T}_2$  пытается повернуть рельс против хода часовой стрелки;  $M_3 = -mgl/2$  — сила тяжести пытается повернуть рельс по ходу часовой стрелки.

Спроецируем первое уравнение на ось  $OY$ , подставим выражения для моментов сил и получим систему линейных уравнений: 
$$\begin{cases} T_1 + T_2 - mg = 0, \\ T_2(l - a) - mgl/2 = 0. \end{cases}$$

Найдем  $T_2$  из второго уравнения системы:  $T_2(l - a) = \frac{mgl}{2} \Rightarrow T_2 = \frac{mgl}{2(l - a)}$ .

Найдем  $T_1$  из первого уравнения системы:  $T_1 = mg - T_2$ .

Проверим единицу, найдем значения искомых величин:

$$[T_2] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 = \text{Н}; \quad T_2 = \frac{900 \cdot 10 \cdot 10}{2 \cdot (10 - 1)} = 5000 \text{ (Н)}.$$

$$[T_1] = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 - \text{Н} = \text{Н} - \text{Н} = \text{Н}; \quad T_1 = 900 \cdot 10 - 5000 = 4000 \text{ (Н)}.$$

*Анализ результатов.* Первый трос действует на рельс с меньшей силой, поскольку сила приложена дальше от центра тяжести тела. Результат реален.

**Ответ:**  $T_1 = 4$  кН;  $T_2 = 5$  кН.



### Подводим итоги

• Равновесие тела — это сохранение состояния движения или покоя тела с течением времени. Сохранение состояния движения означает, что скорости поступательного и вращательного движений тела остаются неизменными.

• Тело будет в равновесии, если соблюдены два условия: 1) равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$ ; 2) сумма моментов всех сил, действующих на тело, равна нулю:  $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$ .

• Различают устойчивое, неустойчивое, безразличное равновесия тел. При устойчивом равновесии тело, незначительно отклоненное от положения равновесия, возвращается в исходное положение; при неустойчивом — еще больше отклоняется от исходного положения, при безразличном — остается в своем новом положении.



### Контрольные вопросы

1. Что называют равновесием тела? 2. Дайте определение центра масс. 3. Охарактеризуйте момент силы как физическую величину. 4. При каких условиях тело находится в равновесии? 5. Какое равновесие тел называют устойчивым? неустойчивым? безразличным? 6. Когда тело, опирающееся на горизонтальную плоскость, находится в состоянии устойчивого равновесия?



### Упражнение № 14

1. В положении какого равновесия находятся тела на рис. 1?
2. Когда человек несет тяжелый груз на спине, то наклоняется вперед, а когда несет груз перед собой, отклоняется назад. Почему?
3. Почему при сильном наклоне судно может перевернуться (рис. 2)? Где расположить груз (в трюме или на палубе), чтобы судно было устойчивее?

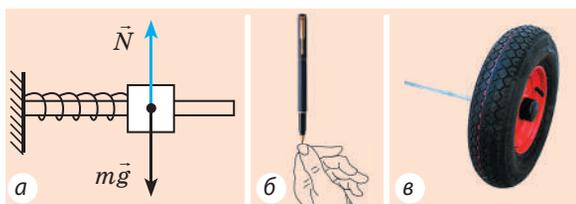


Рис. 1

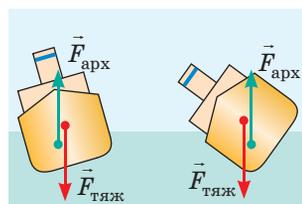


Рис. 2

4. Доска массой 10 кг подперта на расстоянии 1/4 ее длины. Какую силу перпендикулярно доске нужно приложить к ее короткому концу, чтобы удержать доску в горизонтальном положении?
5. Лестница опирается на гладкую вертикальную стену. Коэффициент трения между ножками лестницы и полом 0,4. Какой наибольший угол может образовать лестница со стеной? Центр тяжести лестницы — посередине лестницы.
6. Почему лавка перевернулась (рис. 3)? Составьте задачу, задайте массу тел. Какой должна быть масса профессора, чтобы лавка осталась неподвижной?



Рис. 3



### Экспериментальное задание

Сцепив две вилки, закрепите их на одном конце спички, а второй конец спички расположите на острие циркуля, как показано на рис. 4. Объясните, почему вилки не падают. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, найдите еще несколько интересных опытов на равновесие тел и проведите их.



Рис. 4

## § 15. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ. МОЩНОСТЬ



Чтобы шли механические часы, их нужно завести — закрутить пружину; раскручиваясь, пружина совершит работу. Поднявшись на вершину горы, лыжник создаст «запас работы» и в результате сможет скатиться вниз; при этом работу совершит сила тяжести. Самый простой способ разбить окно в горящем доме — бросить в окно камень. Если скорость движения камня достаточна, он разобьет окно — совершит работу.

О теле или системе тел, которые могут совершить работу, говорят, что они обладают энергией. О механической энергии и механической работе пойдет речь в данном параграфе.

1

### Когда сила совершает механическую работу

Основная задача механики — определение механического состояния тела (координат тела и скорости его движения) в любой момент времени. Механическое состояние тела не изменяется само по себе — необходимо взаимодействие, то есть наличие силы. Когда тело перемещается (изменяет свое механическое состояние) под действием силы, говорят, что данная сила совершает *механическую работу*.

**Механическая работа (работа силы)  $A$**  — физическая величина, характеризующая изменение механического состояния тела и равная произведению модуля силы  $F$ , модуля перемещения  $s$  и косинуса угла  $\alpha$  между вектором силы и вектором перемещения:

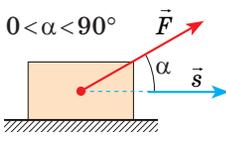
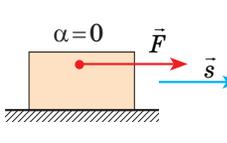
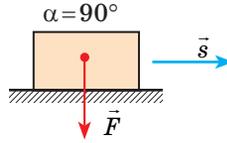
$$A = F s \cos \alpha$$

Единица работы в СИ — джоуль:

$$[A] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}).$$

1 Дж равен механической работе, которую совершает сила 1 Н, перемещающая тело на 1 м в направлении действия этой силы.

Работа силы — величина скалярная, однако она может быть положительной, отрицательной, равной нулю — в зависимости от того, куда направлена сила относительно направления движения тела (см. таблицу на с. 93).

Работа положительна, $A > 0$	Работа отрицательна $A < 0$	Работа равна нулю $A = 0$
		
$A = F s \cos \alpha,$ $\cos \alpha > 0$	$A = F s,$ $\cos \alpha = 1$	$A = -F s,$ $\cos \alpha = -1$
		$A = 0,$ $\cos \alpha = 0$

**?** Подумайте, при каких еще углах  $\alpha$ , не указанных в таблице, работа силы будет отрицательна. В каких еще случаях работа силы будет равна нулю?

## 2 Геометрический смысл работы силы

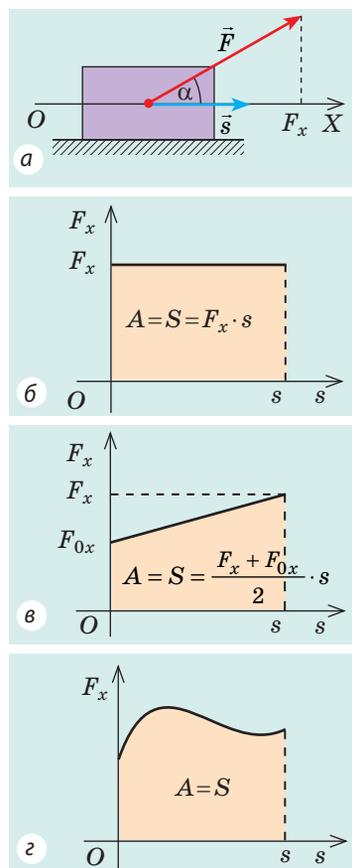
Рассмотрим силу, действующую под некоторым углом  $\alpha$  к направлению движения тела. Найдем проекцию этой силы на направление перемещения тела, для чего ось  $OX$  направим в сторону движения тела (рис. 15.1, а). Из рисунка видим, что  $F_x = F \cos \alpha$ , следовательно,  $A = F_x \cdot s$ .

Построим график  $F_x(s)$  — зависимости проекции силы от модуля перемещения. Если сила, действующая на тело, постоянна, график этой зависимости представляет собой отрезок прямой, параллельной оси перемещения (рис. 15.1, б). Из рисунка видим, что произведение  $F_x$  и  $s$  соответствует площади  $S$  прямоугольника под графиком. В этом состоит **геометрический смысл работы силы**: работа силы численно равна площади фигуры под графиком зависимости проекции силы от модуля перемещения. Это утверждение распространяется и на случаи, когда сила переменная (рис. 15.1, в, г).

## 3 Когда тело имеет кинетическую энергию

Рассмотрим тело массой  $m$ , которое под действием равнодействующей силы  $\vec{F}$  увеличивает скорость своего движения от  $v_0$  до  $v$ . Пусть равнодействующая  $\vec{F}$  не изменяется со временем и направлена в сторону движения тела. Определим работу этой силы.

- По определению работы:  $A = F s \cos \alpha$ .



**Рис. 15.1.** Если направление оси  $OX$  совпадает с направлением движения тела, то работа  $A$  силы численно равна площади  $S$  фигуры под графиком зависимости  $F_x(s)$

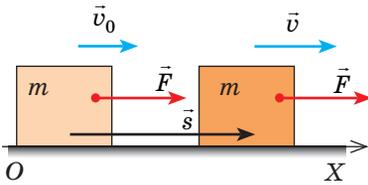


Рис. 15.2. К выводу теоремы о кинетической энергии

- Сила действует в направлении движения тела ( $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{s}$ ), поэтому угол  $\alpha$  в данном случае равен нулю, то есть  $\cos\alpha = 1$  (рис. 15.2).

- Сила  $\vec{F}$  неизменна и направлена в сторону движения тела, поэтому тело движется равноускоренно, а значит,  $s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$ .

- Согласно второму закону Ньютона:  $F = ma$ .

Подставим выражения для  $F$ ,  $s$  и  $\cos\alpha$  в формулу работы:

$$A = ma \cdot \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2}, \text{ или } A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

Величину  $\frac{mv^2}{2}$  называют *кинетической энергией тела*  $E_k$ .

**Кинетическая энергия** — физическая величина, которая характеризует механическое состояние движущегося тела и равна половине произведения массы  $m$  тела на квадрат скорости  $v$  его движения:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

**Теорема о кинетической энергии:** работа равнодействующей всех сил, которые действуют на тело, равна изменению кинетической энергии тела:

$$A = E_k - E_{k0} = \Delta E_k$$

Если в начальный момент времени тело неподвижно ( $v_0 = 0$ ), то есть  $E_{k0} = 0$ , то теорема о кинетической энергии сводится к равенству:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

*Кинетическая энергия тела, движущегося со скоростью  $v$ , равна работе, которую совершает сила, чтобы придать неподвижному телу данную скорость.*

**?** Какую работу совершила над вами сила тяжести, если, спрыгивая со ступеньки, вы достигли скорости 3 м/с?

#### 4 Вспоминаем о мощностях

До сих пор мы говорили о работе силы. Но любая сила характеризует действие определенного тела (или поля). Поэтому работу силы часто называют работой тела (работой поля), со стороны которого действует эта сила. На практике большое значение имеет не только выполненная работа, но и время, за которое эта работа была выполнена. Поэтому для характеристики

\* По данной формуле определяют *кинетическую энергию поступательного движения тела*. Если тело еще и вращается, то кроме кинетической энергии поступательного движения оно также обладает *кинетической энергией вращательного движения*.

механизмов, предназначенных для совершения работы, используют понятие *мощности*.

**Мощность  $P$**  (или  $N$ ) — физическая величина, характеризующая скорость выполнения работы и равная отношению работы  $A$  к интервалу времени  $t$ , за который эта работа выполнена:

$$P = \frac{A}{t}$$

Единица мощности в СИ — **ватт**:

$$[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \left( 1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} \right).$$

(Названа в честь *Джеймса Ватта* (1736–1819). Как единицу мощности он ввел *лошадиную силу*, которую иногда используют и сейчас: 1 л. с. = 746 Вт.)

Мощность, которую развивает транспортное средство, удобно определять через силу тяги и скорость движения. Если тело движется равномерно, а направление силы тяги совпадает с направлением перемещения, тяговую мощность двигателя можно вычислить по формуле:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = Fv.$$

*Обратите внимание!* Данная формула справедлива для любого движения: *мощность, которую развивает двигатель в данный момент времени, равна произведению модуля силы тяги двигателя на модуль его мгновенной скорости*:  $P = Fv$  (рис. 15.3).



**Рис. 15.3.** Когда для движения автомобиля требуется большая сила тяги, водитель переходит на меньшую скорость или нажимает на газ, увеличивая таким образом мощность двигателя

### 5 Учимся решать задачи

Чтобы определить механическую работу и мощность, нужно знать *силу*, действующую на тело, *перемещение* тела и *время* его движения. Поэтому обычно решение задач на определение работы и мощности сводится к решению задач по кинематике и динамике.

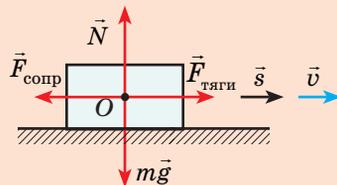
**Задача.** Автомобиль массой 2 т движется равномерно со скоростью 20 м/с по горизонтальному участку дороги. Какие силы действуют на автомобиль? Найдите работу каждой силы и тяговую мощность двигателя автомобиля, если коэффициент сопротивления движению равен 0,01, а время движения — 50 с.

Дано:  
 $m = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$   
 $v = 20 \text{ м/с}$   
 $\mu = 0,01$   
 $t = 50 \text{ с}$

$A$  — ?  
 $P$  — ?

**Решение.** Выполним пояснительный рисунок, на котором укажем силы, действующие на автомобиль: силу тяжести  $m\vec{g}$ , силу тяги  $\vec{F}_{\text{тяги}}$ , силу сопротивления движению  $\vec{F}_{\text{сопр}}$ , силу  $\vec{N}$  нормальной реакции опоры.

По определению работы:  $A = Fscos\alpha$ .



Чтобы определить работу каждой силы, нужно найти::

- угол между направлением этой силы и направлением перемещения;
- модуль силы и модуль перемещения.

1. Автомобиль движется равномерно, поэтому действующие на него силы скомпенсированы:

— сила тяжести уравновешена силой нормальной реакции опоры:  $N = mg$ ;

— сила тяги уравновешена силой сопротивления движению:  $F_{\text{тяги}} = F_{\text{сопр}} = \mu N$ .

2. Перемещение автомобиля можно найти по формуле:  $s = vt$ .

3. Сила тяжести и сила нормальной реакции опоры перпендикулярны направлению движения автомобиля ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ ). Следовательно, работа этих сил равна нулю. Сила тяги направлена в сторону движения тела:  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ , поэтому:

$$A(F_{\text{тяги}}) = F_{\text{тяги}} s = \mu mgvt.$$

Сила сопротивления противоположна движению:  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos \alpha = -1$ , поэтому:

$$A(F_{\text{сопр}}) = -F_{\text{сопр}} s = -\mu mgvt.$$

4. Тяговую мощность двигателя автомобиля определим по формуле  $P = \frac{A(F_{\text{тяги}})}{t}$ .

Проверим единицы, найдем значения искомых величин:

$$[A] = \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}; [P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

$$A(F_{\text{тяги}}) = 0,01 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 50 = 200 \cdot 10^3 \text{ (Дж)}; A(F_{\text{сопр}}) = -200 \text{ кДж};$$

$$P = \frac{200 \cdot 10^3}{50} = 4 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}.$$

Ответ:  $A(F_{\text{тяж}}) = 0$ ;  $A(N) = 0$ ;  $A(mg) = 0$ ;  $A(F_{\text{тяги}}) = 200 \text{ кДж}$ ;  $A(F_{\text{сопр}}) = -200 \text{ кДж}$ ;  
 $P = 4 \text{ кВт}$ .



### Подводим итоги

• Работа силы — физическая величина, которая характеризует изменение механического состояния тела и вычисляется по формуле:  $A = Fscos\alpha$ . Единица работы в СИ — джоуль:  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

• Работа равнодействующей всех сил, действующих на тело, равна изменению кинетической энергии тела:  $A = E_k - E_{k0} = \Delta E_k$ .

• Кинетическая энергия — физическая величина, характеризующая механическое состояние движущегося тела и равная половине произведения массы  $m$  тела на квадрат скорости  $v$  его движения:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .

• Мощность  $P$  (или  $N$ ) — это физическая величина, характеризующая скорость выполнения работы и равная отношению работы  $A$  к интервалу времени  $t$ , за который она выполнена:  $P = \frac{A}{t}$ . Мощность можно также найти по формуле:  $P = Fv$ .



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение механической работы. Какова ее единица в СИ?
2. В каких случаях значение работы силы положительно? отрицательно? равно нулю?
3. Каков геометрический смысл работы силы?
4. Дайте определение кинетической энергии.
5. Докажите теорему о кинетической энергии.
6. Сформулируйте определение мощности. Какова ее единица в СИ? Как определить мощность в данный момент времени?



### Упражнение № 15

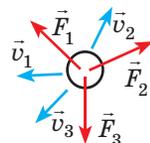
1. Приведите примеры ситуаций, когда сила, действующая на тело, совершает положительную работу; отрицательную работу; не совершает работу.
2. Какую работу нужно совершить, чтобы равномерно поднять груз массой 10 кг на высоту 5 м?
3. Во время космических полетов серьезной опасностью может стать столкновение корабля с небольшими высокоскоростными метеоритами. Определите кинетическую энергию метеорита массой 1 кг, движущегося со скоростью 60 км/с.
4. На рисунке показаны силы, действующие на тело. Установите соответствие между возможным направлением движения тела и знаком работы каждой из сил.

1  $\vec{v}_1$                     А  $A_1 > 0, A_2 < 0, A_3 = 0$

2  $\vec{v}_2$                     Б  $A_1 > 0, A_2 > 0, A_3 < 0$

3  $\vec{v}_3$                     В  $A_1 < 0, A_2 > 0, A_3 > 0$

Г  $A_1 = 0, A_2 < 0, A_3 > 0$



5. Автомобиль массой 1 т увеличил скорость своего движения от 10 до 20 м/с. Определите работу равнодействующей сил, действующих на автомобиль.
6. Ракета, летевшая со скоростью  $v_0$ , разогналась, вдвое увеличив скорость своего движения. При этом масса ракеты в результате сгорания топлива уменьшилась в два раза. Во сколько раз изменилась кинетическая энергия ракеты?
7. Автомобиль массой 2 т трогается с места и, двигаясь с ускорением 2 м/с<sup>2</sup>, разгоняется на горизонтальном участке дороги до скорости 20 м/с. Определите работу силы тяги и среднюю мощность двигателя автомобиля, если коэффициент сопротивления движению равен 0,01.
8. Когда человек стоит и держит тяжелый груз, он не совершает работу, ведь в этом случае перемещение груза равно нулю. Почему же человек устает?
9. Вспомните, какой еще вид механической энергии, кроме кинетической, вы знаете. Приведите примеры тел, обладающих этой энергией.



### Физика и техника в Украине



Государственное предприятие «Антонов» (Киев) — украинский авиастроительный концерн, объединяющий конструкторское бюро, комплекс лабораторий, испытательный комплекс и экспериментальный завод.

В 1946 г. в Новосибирске было создано опытно-конструкторское бюро — ОКБ-153, главным конструктором которого был назначен выдающийся украинский советский самолетостроитель *Олег Константинович Антонов* (1906–1984). В 1952 г. ОКБ переехало в Киев, где началось серийное производство известного «кукурузника» — самолета Ан-2.

Сегодня на предприятии выпускают более 100 типов самолетов, выполняют проектирование, производство, модернизацию авиационной техники и наземного транспорта, осуществляют международные грузовые авиаперевозки и т. п.



## § 16. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



Поднятый молот не обладает кинетической энергией, так как его скорость равна нулю. Но если молот отпустить, он совершит работу (расплющит металл). Натянутая тетива лука не имеет кинетической энергии, но, выпрямляясь, она придаст скорость стреле, а значит, совершит работу. И деформированное тело, и тело, поднятое над поверхностью Земли, способны совершить работу, то есть обладают энергией. Что это за энергия и как ее рассчитать?

1

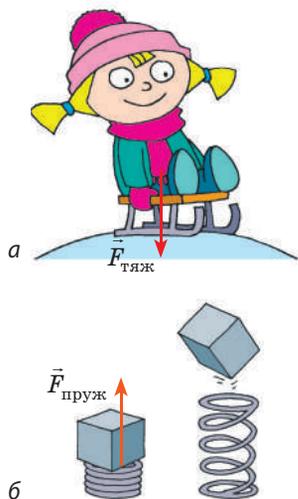
### Когда тело обладает потенциальной энергией

**Механическая энергия  $E$**  — физическая величина, характеризующая способность тела (системы тел) совершить работу.

*Единица энергии (как и работы) в СИ — джоуль  $[E]=1$  Дж (J).*

Любое движущееся тело может совершить работу, поскольку оно обладает кинетической энергией, или «живой силой», как ее называли раньше. Есть еще один вид механической энергии — ее называли «мертвая сила». Это — *потенциальная энергия* (от лат. *potentia* — сила, возможность), — энергия, которую имеет тело в результате взаимодействия с другими телами.

**Потенциальная энергия** — энергия, которой обладает тело вследствие взаимодействия с другими телами или вследствие взаимодействия частей тела.



Девочка на вершине горки (рис. 16.1, *а*) обладает потенциальной энергией, поскольку в результате взаимодействия с Землей может начать движение и сила тяжести совершит работу. Но как вычислить эту работу, ведь горка неровная и в течение всего времени движения угол между направлением силы тяжести и направлением перемещения будет изменяться?

Сжатая пружина (рис. 16.1, *б*) тоже обладает потенциальной энергией: при распрямлении пружины сила упругости совершит работу — подбросит брусок. Но как вычислить эту работу, ведь во время действия пружины на брусок сила упругости непрерывно уменьшается?

Оказывается, все не так сложно. И сила тяжести, и сила упругости имеют одно «замечательное» свойство — работа этих сил не зависит от формы траектории.

**Рис. 16.1.** И девочка в результате взаимодействия с Землей (*а*), и сжатая пружина в результате взаимодействия ее витков (*б*) обладают потенциальной энергией

Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным механическими состояниями тела (системы тел), называют **потенциальными**, или **консервативными, силами** (от лат. *conservare* — сохранять, охранять).

## 2 Потенциальная энергия поднятого тела

Докажем, что сила тяжести — консервативная сила. Для этого определим работу силы тяжести при движении тела из точки  $K$  в точку  $B$  по разным траекториям.

*Случай 1.* Пусть траектория движения тела — «ступенька» (рис. 16.2, а): сначала тело падает с некоторой высоты  $h_0$  до высоты  $h$  и сила тяжести совершает работу  $A_1$ , затем тело движется горизонтально и сила тяжести совершает работу  $A_2$ . Работа — величина аддитивная, поэтому общая работа  $A = A_1 + A_2$ .

$A_1 = F_{\text{тяж}} s_1 \cos \alpha$ , где  $F_{\text{тяж}} = mg$ ,  $s_1 = h_0 - h$ ,  $\cos \alpha = 1$  ( $\alpha = 0$ ), поэтому  $A_1 = mg(h_0 - h) = mgh_0 - mgh$ ;  $A_2 = 0$ , так как сила тяжести перпендикулярна перемещению тела. Итак:  $A = mgh_0 - mgh$ .

*Случай 2.* Пусть тело перемещается из точки  $K$  в точку  $B$ , скользя по наклонной плоскости (рис. 16.2, б). В этом случае работа силы тяжести равна:  $A = mgs \cos \alpha = mg(h_0 - h) = mgh_0 - mgh$ .

Тот же результат получим и для случаев перемещения тела по произвольной траектории. Следовательно, *работа силы тяжести не зависит от траектории движения тела, то есть сила тяжести — консервативная сила.*

Величину  $mgh$  называют **потенциальной энергией поднятого тела**:

$$E_p = mgh$$

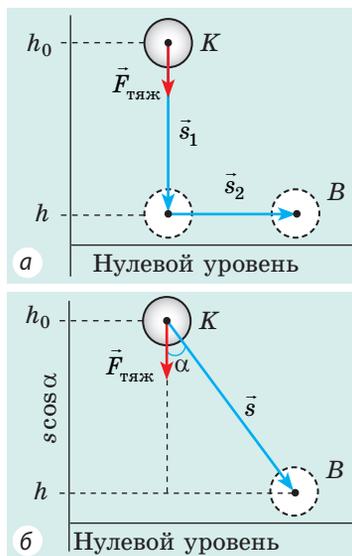
Потенциальная энергия поднятого тела зависит от высоты, на которой находится тело, то есть зависит от выбора *нулевого уровня*, — уровня, от которого будет отсчитываться высота. Нулевой уровень выбирают из соображений удобства. Так, находясь в комнате, за нулевой уровень целесообразно взять пол, определяя высоту горы — поверхность Мирового океана.

*Обратите внимание!* Изменение потенциальной энергии, а следовательно, и работа силы тяжести от выбора нулевого уровня не зависят.

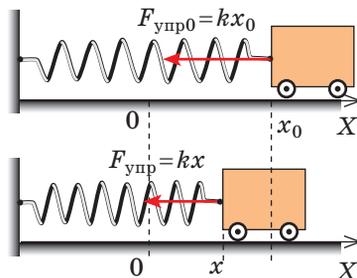
## 3 Потенциальная энергия упруго деформированного тела

Пусть имеется упруго деформированное тело — растянутая пружина. Определим работу, которую совершит сила упругости при уменьшении удлинения пружины от  $x_0$  до  $x$  (рис. 16.3).

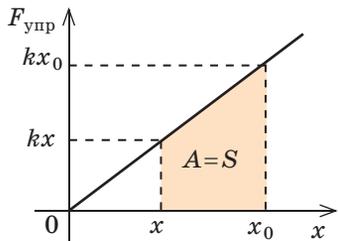
Воспользуемся для этого геометрическим смыслом механической работы (рис. 16.4):



**Рис. 16.2.** При перемещении тела с высоты  $h_0$  до высоты  $h$  работа силы тяжести, независимо от траектории движения тела, определяется по формуле:  $A = mgh_0 - mgh$



**Рис. 16.3.** Если пружину освободить, то, сжимаясь, она совершит работу (приведет в движение тележку), при этом деформация пружины уменьшится



**Рис. 16.4.** Сила упругости линейно зависит от удлинения ( $F_{\text{упр}} = kx$ ), поэтому график зависимости  $F_{\text{упр}}(x)$  — отрезок прямой, а работа силы упругости численно равна площади трапеции под графиком

$$A = \frac{kx_0 + kx}{2}(x_0 - x) \Rightarrow A = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

Таким образом, работа силы упругости определяется только начальным и конечным состояниями пружины, то есть сила упругости — консервативная сила. Величину  $kx^2/2$  называют **потенциальной энергией упруго деформированного тела**:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}$$

Работа силы упругости (как и силы тяжести) равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком:

$$A = E_{p0} - E_p = -\Delta E_p$$

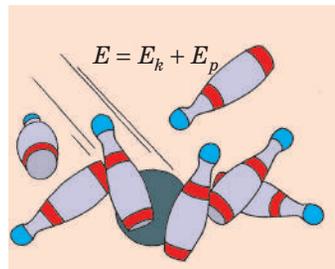
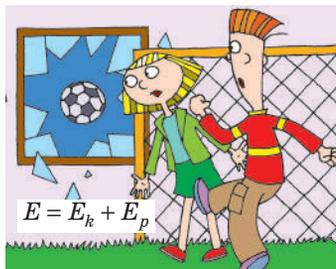
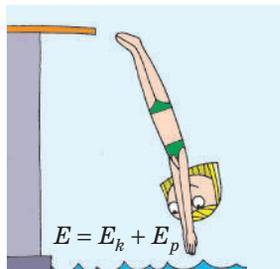
Данное выражение — математическая запись **теоремы о потенциальной энергии**: работа всех консервативных сил, действующих на тело, равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком.

Состояние с меньшей потенциальной энергией является энергетически выгодным; любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна, — в этом заключается **принцип минимума потенциальной энергии**. Действительно, камень, выпущенный из руки, никогда не полетит вверх — он будет падать, стремясь достичь состояния с наименьшей потенциальной энергией. Недеформированная пружина никогда не станет сама растягиваться или сжиматься, а деформированная пружина стремится перейти в недеформированное состояние.

#### 4 Закон сохранения полной механической энергии

Как правило, тело или система тел обладают и потенциальной, и кинетической энергиями.

Сумму кинетических и потенциальных энергий тел системы называют **полной механической энергией системы тел**:  $E = E_k + E_p$  (рис. 16.5).



**Рис. 16.5.** Полная механическая энергия  $E$  системы тел равна сумме потенциальной энергии  $E_p$  (определяется взаимным расположением тел системы) и кинетической энергии  $E_k$  (определяется скоростью движения тел системы)

Рассмотрим замкнутую систему тел, взаимодействующих друг с другом *только консервативными силами* (силами тяготения или силами упругости). По теореме о потенциальной энергии работа  $A$ , совершаемая этими силами, равна:  $A = E_{p0} - E_p$ . С другой стороны, согласно теореме о кинетической энергии *эта же работа* равна:  $A = E_k - E_{k0}$ . Приравняв правые части равенств, получим **закон сохранения и превращения полной механической энергии**:

В замкнутой системе тел, взаимодействующих только консервативными силами, полная механическая энергия остается неизменной (сохраняется):

$$E_{p0} + E_{k0} = E_p + E_k$$

Закон сохранения полной механической энергии предполагает *превращение кинетической энергии в потенциальную и наоборот (рис. 16.6)*. Однако сохраняется ли при этом полная механическая энергия? Наш опыт подсказывает, что нет. И действительно, *закон сохранения полной механической энергии справедлив только в случаях, когда в системе отсутствует трение*. Однако в природе не существует движений, не сопровождающихся трением. Сила трения всегда направлена против движения тела, поэтому при движении она совершает отрицательную работу, при этом полная механическая энергия системы уменьшается:

$$A_{\text{тр}} = E - E_0 = \Delta E,$$

где  $A_{\text{тр}}$  — работа силы трения;  $E$ ,  $E_0$  — полная механическая энергия системы в конце и в начале наблюдения соответственно.

Потери энергии наблюдаются и в случае неупругого удара.

Так что, при наличии трения или при неупругой деформации энергия бесследно исчезает? Кажется бы, да. Однако измерения показывают, что в результате и трения, и неупругого удара температуры взаимодействующих тел увеличиваются, то есть увеличиваются внутренние энергии тел. Значит, кинетическая энергия не исчезает, а переходит во внутреннюю энергию.

**Энергия никуда не исчезает и нигде не появляется: она только переходит из одного вида в другой, передается от одного тела к другому.**

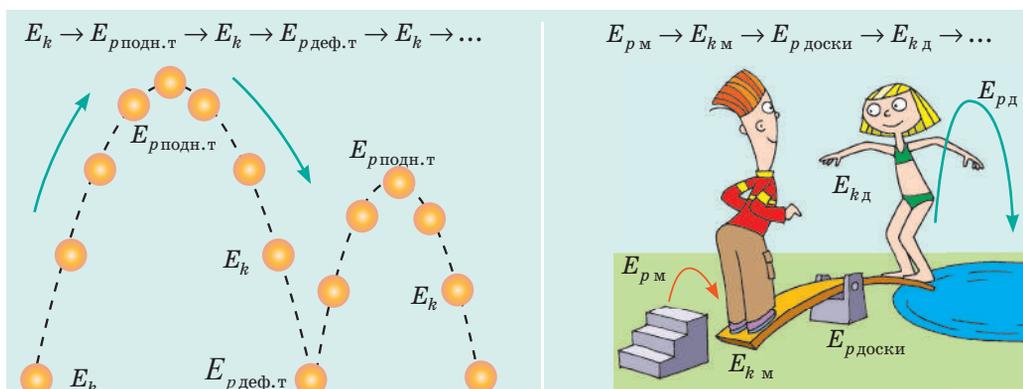


Рис. 16.6. Переход одного вида механической энергии в другой вид наблюдается повсюду

**Алгоритм решения задач с применением закона сохранения механической энергии**

1. Прочитайте условие задачи. Выясните, является ли система замкнутой, можно ли пренебречь действием сил сопротивления. Запишите краткое условие задачи.

2. Выполните пояснительный рисунок, на котором укажите нулевой уровень, начальное и конечное состояния тела (системы тел).

3. Запишите закон сохранения механической энергии. Конкретизируйте запись, воспользовавшись данными условия задачи и соответствующими формулами для определения энергии.

4. Решите полученное уравнение относительно неизвестной величины.

5. Проверьте единицу, найдите значение искомой величины.

6. Проанализируйте результат, запишите ответ.

**5 Учимся решать задачи**

**Задача.** Какую минимальную скорость нужно сообщить шарик, подвешенному на нити длиной 0,5 м, чтобы он смог совершить полный оборот в вертикальной плоскости? Сопротивлением воздуха пренебречь.

*Анализ физической проблемы*

- Сопротивлением воздуха пренебрегаем, поэтому система «шарик — нить — Земля» является замкнутой и можно воспользоваться законом сохранения механической энергии.

- За нулевой уровень примем самое низкое положение шарика.

- В самой высокой точке траектории шарик имеет некоторую скорость, иначе он не продолжил бы вращаться, а стал бы падать вертикально вниз.

- Для определения скорости движения шарика в наивысшей точке траектории воспользуемся определением центростремительного ускорения и вторым законом Ньютона.

- Нужно найти *минимальную* скорость движения шарика в момент толчка, поэтому понятно, что в наивысшей точке траектории нить натянута не будет, то есть сила ее натяжения будет равна нулю.

**Дано:**  
 $l = 0,5 \text{ м}$   
 $g = 10 \text{ м/с}^2$   
 $v_0 = ?$

**Решение.** На рисунке отметим положения шарика в самой нижней и самой верхней точках траектории; силы, действующие на шарик в верхней точке; направление ускорения. По закону сохранения механической энергии:  $E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$ .

$$\begin{aligned} E_{k0} &= \frac{mv_0^2}{2}, & E_k &= \frac{mv^2}{2}, \\ E_{p0} &= 0; & E_p &= mgh = mg \cdot 2l; \end{aligned}$$

$$\frac{mv_0^2}{2} + 0 = \frac{mv^2}{2} + 2mgl \Rightarrow v_0^2 = v^2 + 4gl \quad (1).$$

Согласно второму закону Ньютона:  $mg = ma_{\text{цс}} \Rightarrow g = a_{\text{цс}}$ .

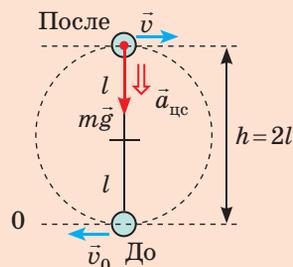
Поскольку  $a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}$ , а  $r = l$ , получим:  $\frac{v^2}{l} = g$ , то есть  $v^2 = lg$  (2).

Подставим выражение (2) в выражение (1):  $v_0^2 = gl + 4gl = 5gl \Rightarrow v_0 = \sqrt{5gl}$ .

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[v_0] = \sqrt{\frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}} = \sqrt{\frac{\text{М}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{М}}{\text{с}}; \quad v_0 = \sqrt{5 \cdot 10 \cdot 0,5} = \sqrt{25} = 5 \text{ (м/с)}.$$

**Ответ:**  $v_0 = 5 \text{ м/с}$ .





### Подводим итоги

- Механическая энергия  $E$  — физическая величина, характеризующая способность тела (системы тел) совершить работу. Полная механическая энергия системы тел состоит из кинетических энергий движения тел этой системы и потенциальных энергий их взаимодействий:  $E = E_k + E_p$ .
- Потенциальная энергия — энергия, которой обладает тело вследствие взаимодействия с другими телами или вследствие взаимодействия частей тела друг с другом. Потенциальная энергия поднятого тела вычисляется по формуле  $E_p = mgh$ , упруго деформированного тела — по формуле  $E_p = kx^2/2$ .
- Сила упругости и сила тяжести — консервативные (потенциальные) силы: работа этих сил не зависит от формы траектории и равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком:  $A = E_{p0} - E_p = -\Delta E_p$ . В замкнутой системе тел, взаимодействующих только консервативными силами, полная механическая энергия остается неизменной (сохраняется):  $E_{p0} + E_{k0} = E_p + E_k$ .



### Контрольные вопросы

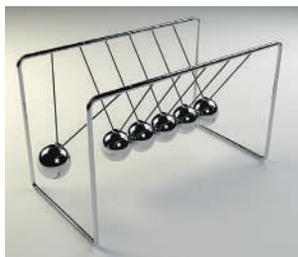
1. Дайте определение механической энергии; потенциальной энергии.
2. Докажите, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории.
3. По какой формуле определяют потенциальную энергию упруго деформированного тела?
4. В чем состоит принцип минимума потенциальной энергии? Приведите примеры.
5. При каких условиях выполняется закон сохранения полной механической энергии?
6. Приведите примеры, когда полная механическая энергия не сохраняется. Что можно сказать о полной энергии системы?



### Упражнение № 16

1. Человек поднял ведро с песком массой 15 кг на высоту 6 м, а затем вернул его обратно. Совершила ли при этом работу сила тяжести? Если да, то вычислите ее.
2. Докажите, что в случае, когда тело движется по замкнутой траектории, работа консервативных сил равна нулю.
3. Тело массой 1 кг обладает потенциальной энергией 20 Дж. На какую высоту относительно нулевого уровня поднято тело?
4. Пружинный пистолет «заряжают» шариком, а затем стреляют вверх. Какие при этом происходят превращения энергии?
5. Камень, до этого находившийся в состоянии покоя, падает с высоты 20 м. На какой высоте скорость движения камня будет 10 м/с? С какой скоростью камень упадет на землю? Сопротивлением воздуха пренебречь.
6. К горизонтальной пружине жесткостью 250 Н/м, сжатой на 4 см, прикреплена тележка массой 400 г. Найдите максимальную скорость движения тележки после высвобождения пружины. Потери энергии не учитывайте.
7. Велосипедист, двигавшийся со скоростью 9 км/ч, резко останавливается. Какую работу совершает при этом сила трения? Куда «исчезает» механическая энергия системы? Найдите тормозной путь, если средняя сила трения — 400 Н. Масса велосипедиста вместе с велосипедом — 80 кг.
8. Существует опасное явление природы — сель в горах (поток камней и грязи). Почему при этом тяжелые валуны могут приобретать огромную скорость? Узнайте о селях больше и подготовьте сообщение.

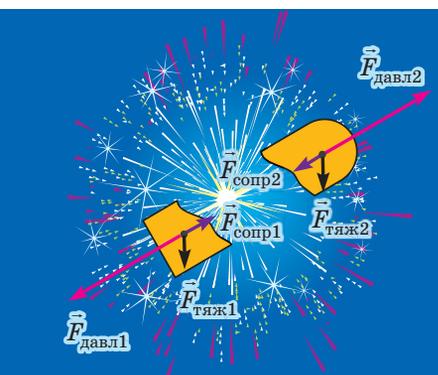
## § 17. ИМПУЛЬС ТЕЛА. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. УПРУГИЙ И НЕУПРУГИЙ УДАРЫ



Многие из вас видели игрушку «колыбель Ньютона» — несколько стальных шаров, подвешенных вплотную друг к другу. Если первый шар отвести в сторону и отпустить, после его удара о систему отклонится последний шар, причем примерно на такой же угол, на который был отведен первый. Вернувшись, последний шар ударит систему из оставшихся шаров, после чего снова отклонится первый шар, а затем все повторится. При этом шары посередине остаются практически неподвижными. Как объяснить действие этой игрушки?



**Рис. 17.1.** Чем больше сила действует на тело и чем дольше ее действие, тем сильнее изменяется импульс тела



**Рис. 17.2.** При разрыве снаряда фейерверка суммарный импульс системы сохраняется, поскольку в момент разрыва внешние силы (сила тяжести и сила сопротивления) незначительны по сравнению с силами давления пороховых газов

### 1 Импульс тела. Закон сохранения импульса

Изучая § 16, вы вспомнили закон сохранения механической энергии, а сейчас вспомните еще одну физическую величину, которая имеет свойство сохраняться, — *импульс тела*.

**Импульс тела**  $\vec{p}$  — векторная физическая величина, равная произведению массы  $m$  тела на скорость  $\vec{v}$  его движения:

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

**Единица импульса тела в СИ — килограмметр в секунду:**  $[p] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ .

Запишем *второй закон Ньютона в импульсном виде*:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{\vec{F}}{m}$ , то есть:

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \text{ или } \vec{F}t = \vec{p} - \vec{p}_0$$

Величину  $\vec{F}t$  называют **импульсом силы**. Таким образом, *импульс силы равен изменению импульса тела*:  $\vec{F}t = \Delta \vec{p}$  (см. [рис. 17.1](#)).

**?** Как изменяется импульс вашего тела, когда на соревнованиях по бегу вы со старта набираете скорость 8 м/с? Найдите среднее значение силы, с которой вы отталкиваетесь от грунта, если разбег длится 2 с.

*В замкнутой системе тел* — системе, в которой тела взаимодействуют только друг с другом, а внешние силы отсутствуют, уравновешены или пренебрежимо малы (см., например, [рис. 17.2](#)), *суммарный импульс тел остается неизменным*

(сохраняется), то есть выполняется **закон сохранения импульса**:

В замкнутой системе тел векторная сумма импульсов тел до взаимодействия равна векторной сумме импульсов тел после взаимодействия:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n,$$

где  $n$  — количество тел системы.

Учитывая, что импульс тела равен произведению массы  $m$  и скорости  $\vec{v}$  движения тела, закон сохранения импульса можно записать так:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} + \dots + m_n\vec{v}_{0n} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n$$

С проявлениями закона сохранения импульса мы имеем дело в природе, технике и т. д. Рассмотрим два примера применения данного закона: *реактивное движение и столкновение тел*.

## 2 От чего отталкиваются ракеты

Вспомните опыт с шариком, который движется благодаря воздуху, вырывающемуся из его отверстия (рис. 17.3). Это движение — пример *реактивного движения*.

**Реактивное движение** — это движение, возникающее при отделении с некоторой скоростью от тела его части.

Реактивное движение можно наблюдать в природе (рис. 17.4); его широко используют в технике: простейшие поливные системы, автомобили на реактивной тяге, катера с водометными двигателями, реактивные самолеты и, конечно, *ракеты*, ведь реактивное движение — это единственный способ передвижения в безвоздушном пространстве.

**Ракета** — летательный аппарат, который движется в пространстве благодаря реактивной тяге, возникающей при отбросе ракетой части собственной массы.

Отделяющейся частью ракеты является струя горячего газа, образующегося при сгорании топлива. Когда газовая струя с огромной скоростью выбрасывается из сопла ракеты, оболочка ракеты получает мощный импульс, направленный в сторону, противоположную движению струи.

Если бы топливо сгорало мгновенно, а раскаленный газ сразу весь выбрасывался бы из ракеты, то закон сохранения импульса для системы «оболочка ракеты — раскаленный газ» выглядел бы так:  $0 = m_{об}\vec{v}_{об} + m_{газ}\vec{v}_{газ}$  (поскольку до старта импульс системы равен нулю), а следовательно,

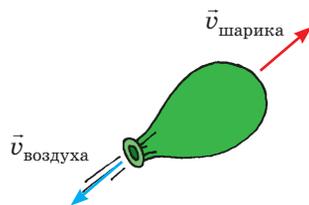


Рис. 17.3. Реактивное движение воздушного шарика

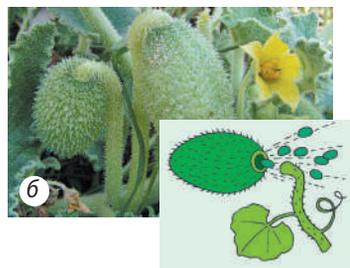


Рис. 17.4. Благодаря реактивному движению передвигаются многие обитатели морей и океанов (а); «бешеный огурец» может преодолеть расстояние до 12 м, рассеивая по пути семена (б)



13 апреля 2018 г. исполнилось 25 лет со дня первого запуска украинской ракеты-носителя «Зенит», созданной в конструкторском бюро «Южное» и на заводе «Южмаш» (Днепр).

Сейчас усовершенствованная трехступенчатая ракета-носитель «Зенит-3SL» является самым большим и самым мощным летательным аппаратом своего класса в мире. Экологически чистый (работает на кислороде и керосине), недорогой, надежный «Зенит» может быть запущен при любых метеорологических условиях, способен вывести на околоземную орбиту спутники массой до 13 т.

Изобретатель и предприниматель Илон Маск, основатель компании SpaceX, работающей в области строительства космического транспорта, на вопрос журналистки о любимой ракете ответил: «Лучшая ракета (после моей) — это «Зенит»».

оболочка ракеты приобретала бы скорость:

$$\vec{v}_{об} = - \frac{m_{газа} \vec{v}_{газа}}{m_{об}}$$

К сожалению, топливо сгорает постепенно, поэтому часть газа приходится «разгонять» вместе с оболочкой; к тому же систему «оболочка ракеты — раскаленный газ» нельзя считать замкнутой (с увеличением скорости ракеты значительно возрастает сопротивление воздуха). Вычисления показывают, что для достижения первой космической скорости (8 км/с) масса топлива должна в 200 раз превышать массу оболочки. А ведь на орбиту нужно поднять не только оболочку, но и оборудование, космонавтов, запасы воды, кислорода и т. п. Поэтому возникла идея *многоступенчатых ракет*: каждая ее ступень содержит запас топлива и собственный реактивный двигатель, который разгоняет ракету, пока не израсходует топливо. После этого ступень отбрасывается, облегчая ракету и сообщая ей дополнительный импульс.

Именно на многоступенчатых ракетах были сделаны первые шаги человечества в космос: 4 октября 1957 г. советские ученые вывели на околоземную орбиту *первый искусственный спутник Земли*, а 12 апреля 1961 г. — космический корабль «Восток», на борту которого был *первый в мире космонавт Юрий Алексеевич Гагарин*; 21 июля 1969 г. американские астронавты *Нил Армстронг* и *Базз Олдрин* впервые высадились на Луне.

Прошло всего 60 лет, а мы уже не можем представить свою жизнь без космоса. Вспомните: спутниковое телевидение и спутниковая связь, система GPS и спутниковый Интернет, надежный прогноз погоды и спутниковые карты. Сейчас созданы космические корабли многоцелевого использования, космические аппараты высадились на Венеру, Марс и другие планеты Солнечной системы.

### 3

#### Упругий и неупругий удары

Кратковременное взаимодействие тел, при котором тела непосредственно касаются друг друга, называют **ударом**.

В системе сталкивающихся тел при ударе обычно возникают большие (по сравнению

с внешними) внутренние силы, поэтому при ударе систему тел можно считать замкнутой и, рассматривая удары, использовать закон сохранения импульса. А вот полная механическая энергия сохраняется не всегда. Потенциальная энергия тел непосредственно до столкновения и сразу после него в большинстве случаев одинакова, поэтому далее речь пойдет только о кинетической энергии.

Если после удара суммарная кинетическая энергия тел сохраняется, такой удар называют **упругим** (рис. 17.5).

Если после удара часть кинетической энергии превращается во внутреннюю энергию (тратится на деформацию и нагревание тел), такой удар называют **неупругим**. Неупругий удар, после которого тела движутся как единое целое, называют **абсолютно неупругим ударом** (рис. 17.6).

Если скорости движения тел до и после удара (упругого или неупругого) направлены вдоль прямой, проходящей через центры масс этих тел, такой удар называют **центральный**.

Абсолютно неупругий центральный удар и упругий центральный удар рассмотрим на примерах решения задач.

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача 1.** Два шара массами 300 и 200 г, движущиеся со скоростями 4 и 2 м/с соответственно, испытывают центральный абсолютно неупругий удар. Определите, какое количество кинетической энергии шаров превратится во внутреннюю энергию, если: 1) шары двигались навстречу друг другу; 2) шары двигались друг за другом.

Дано:

$$m_1 = 0,3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,2 \text{ кг}$$

$$v_{01} = 4 \text{ м/с}$$

$$v_{02} = 2 \text{ м/с}$$

$$E_{k0} - E_k - ?$$

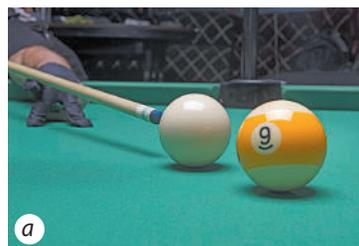
$$E_{k0} - E'_k - ?$$

*Анализ физической проблемы.* Удар абсолютно неупругий, поэтому: 1) после столкновения шары движутся как одно целое; 2) суммарный импульс системы сохраняется; 3) кинетическая энергия системы уменьшается (часть энергии превращается во внутреннюю).

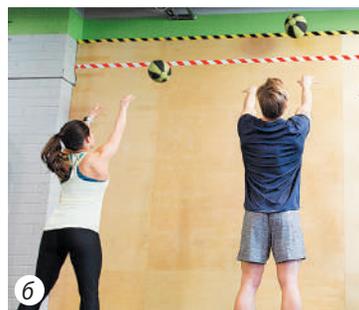
*Решение*

Найдем суммарную кинетическую энергию системы шаров до столкновения:

$$E_{k0} = E_{k01} + E_{k02} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2}; \quad E_{k0} = \frac{0,3 \cdot 16}{2} + \frac{0,2 \cdot 4}{2} = 2,8 \text{ (Дж)}.$$

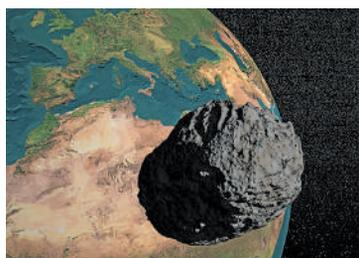


а



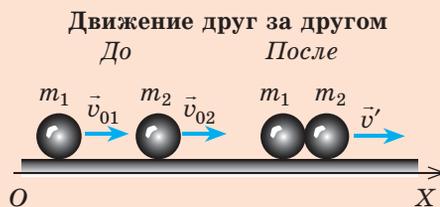
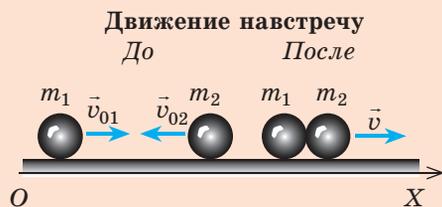
б

**Рис. 17.5.** Удар при столкновении бильярдных шаров (а), удары мяча по бетонной стене (б) можно считать упругими



**Рис. 17.6.** Столкновение метеорита с Землей — пример абсолютно неупругого удара

Выполним пояснительные рисунки; ось  $OX$  направим вдоль движения шаров.



Запишем закон сохранения импульса в векторном виде и в проекциях на ось  $OX$ :

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v};$$

$$m_1 v_{01} - m_2 v_{02} = (m_1 + m_2) v.$$

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = (m_1 + m_2) \vec{v}';$$

$$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = (m_1 + m_2) v'.$$

Найдем скорость движения шаров после столкновения:

$$v = \frac{m_1 v_{01} - m_2 v_{02}}{m_1 + m_2};$$

$$v = \frac{0,3 \cdot 4 - 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 1,6 \text{ м/с.}$$

$$v' = \frac{m_1 v_{01} + m_2 v_{02}}{m_1 + m_2};$$

$$v' = \frac{0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 2}{0,3 + 0,2} = 3,2 \text{ м/с.}$$

Найдем суммарную кинетическую энергию системы шаров после столкновения:

$$E_k = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2};$$

$$E_k = \frac{0,5 \cdot 1,6^2}{2} = 0,64 \text{ (Дж).}$$

$$E'_k = \frac{(m_1 + m_2) v'^2}{2};$$

$$E'_k = \frac{0,5 \cdot 3,2^2}{2} = 2,56 \text{ (Дж).}$$

Выясним, на сколько уменьшилась кинетическая энергия системы шаров:

$$E_{k0} - E_k = 2,8 \text{ Дж} - 0,64 \text{ Дж} = 2,16 \text{ Дж.} \quad | \quad E_{k0} - E'_k = 2,8 \text{ Дж} - 2,56 \text{ Дж} = 0,24 \text{ Дж.}$$

*Ответ:* 1) 2,16 Дж; 2) 0,24 Дж.

**Анализ результатов.** Видим, что в случае лобового удара шаров во внутреннюю энергию превращается значительно большее количество механической энергии.

**?** Подумайте, какое отношение имеют результаты, полученные в задаче, к авариям на дорогах.

**Задача 2.** Два шара одинаковой массы, движущиеся со скоростями 4 и 2 м/с соответственно, испытывают центральный упругий удар. Определите скорость движения шаров после столкновения, если: 1) шары двигались навстречу друг другу; 2) шары двигались друг за другом.

*Дано:*  
 $m_1 = m_2 = m$   
 $v_{01} = 4 \text{ м/с}$   
 $v_{02} = 2 \text{ м/с}$   
 $v_1 - ?$   
 $v_2 - ?$

*Анализ физической проблемы.* Удар упругий, поэтому: 1) после столкновения шары движутся с разными скоростями; 2) суммарный импульс системы сохраняется, поскольку внешние силы, действующие на шары, скомпенсированы; 3) кинетическая энергия системы не изменяется. Для решения задачи воспользуемся законом сохранения импульса и законом сохранения механической энергии. Выполним пояснительные рисунки; ось  $OX$  направим вдоль движения шаров.

Движение навстречу До <span style="margin-left: 100px;">После</span>	Движение друг за другом До <span style="margin-left: 100px;">После</span>
Запишем закон сохранения импульса в проекциях на ось $OX$ и закон сохранения кинетической энергии:	
$m_1 v_{01} - m_2 v_{02} = -m_1 v_1 + m_2 v_2;$ $\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}.$	$m_1 v_{01} + m_2 v_{02} = m_1 v'_1 + m_2 v'_2;$ $\frac{m_1 v_{01}^2}{2} + \frac{m_2 v_{02}^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}.$
Учтем, что $m_1 = m_2 = m$ , и после сокращений получим систему уравнений:	
$\begin{cases} v_{01} - v_{02} = -v_1 + v_2, \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1^2 + v_2^2. \end{cases}$	$\begin{cases} v_{01} + v_{02} = v'_1 + v'_2, \\ v_{01}^2 + v_{02}^2 = v_1'^2 + v_2'^2. \end{cases}$
После простых преобразований получим:	
$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1^2 = v_2^2 - v_{02}^2. \end{cases}$	$\begin{cases} v_{01} - v'_1 = v'_2 - v_{02}, \\ v_{01}^2 - v_1'^2 = v_2'^2 - v_{02}^2. \end{cases}$
Разделим второе уравнение системы на первое и получим более простую систему:	
$\begin{cases} v_{01} + v_1 = v_2 + v_{02}, \\ v_{01} - v_1 = v_2 - v_{02}. \end{cases}$	$\begin{cases} v_{01} - v'_1 = v'_2 - v_{02}, \\ v_{01} + v'_1 = v'_2 + v_{02}. \end{cases}$
Решим полученную систему уравнений методом сложения и найдем скорости движения шаров после столкновения:	
$v_2 = v_{01}; \quad v_1 = v_{02}.$	$v'_2 = v_{01}; \quad v'_1 = v_{02}.$
Ответ: для обоих случаев $v_1 = v_{02} = 2$ м/с; $v_2 = v_{01} = 4$ м/с.	

Видим, что при упругом центральном ударе тела одинаковой массы обмениваются скоростями.



Надеемся, теперь вам нетрудно объяснить, как работает «колыбель Ньютона».



### Подводим итоги

- Импульс тела  $\vec{p}$  — векторная физическая величина, равная произведению массы  $m$  тела на скорость  $\vec{v}$  его движения:  $\vec{p} = m\vec{v}$ . Изменение импульса тела равно импульсу силы:  $\Delta \vec{p} = \vec{F}t$ .

- Систему тел можно считать замкнутой, если внешние силы, действующие на систему, уравновешены или намного меньше внутренних сил системы. В замкнутой системе тел выполняется закон сохранения импульса: геометрическая сумма импульсов тел до взаимодействия равна геометрической сумме импульсов тел после взаимодействия:  $m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$ .

- Реактивное движение — движение, возникающее в результате отделения с некоторой скоростью от тела его части; это единственный способ передвижения в безвоздушном пространстве.



### Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте импульс тела как физическую величину.
2. Сформулируйте второй закон Ньютона в импульсном виде.
3. Сформулируйте и запишите закон сохранения импульса.
4. Что такое реактивное движение? Приведите примеры.
5. Почему для запуска с поверхности Земли космических кораблей используют многоступенчатые ракеты?
6. Какой удар называют неупругим? абсолютно неупругим? упругим? центральным? Приведите примеры.
7. Каков результат упругого центрального удара при столкновении тел одинаковой массы?



### Упражнение № 17

1. Два шара движутся в одном направлении (рис. 1). Как изменится импульс системы шаров после столкновения? Ответ обоснуйте.
2. На рис. 2–4 приведены условия трех задач. Решите задачи, воспользовавшись законом сохранения импульса.

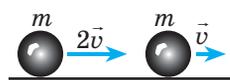


Рис. 1

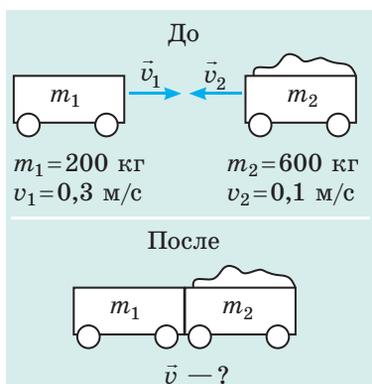


Рис. 2

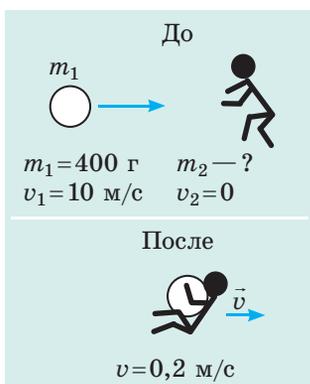


Рис. 3

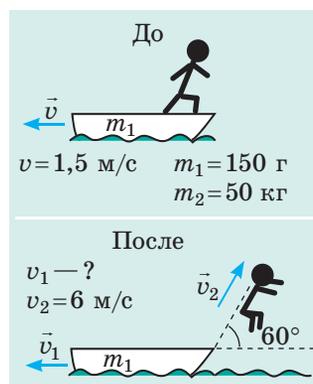


Рис. 4

3. Какова масса шара, если в результате упругого центрального столкновения с неподвижным шаром массой 1 кг скорость его движения уменьшилась от 4 до 2 м/с? Рассмотрите два возможных случая.
4. Определите, какой спортсмен придает спортивному снаряду наибольший импульс: толкатель ядра — ядру; игрок в боулинг — шару; игрок в гольф — мячу. Необходимые данные относительно масс и скоростей движения снарядов найдите в дополнительных источниках информации.



### Экспериментальные задания

1. Возьмите две одинаковые монеты. Одну положите на лист и обведите карандашом. Щелчком толкните на нее вторую монету так, чтобы столкновение монет не было центральным. Проведите линии движения монет, измерьте угол между направлениями их движения. Повторите опыт несколько раз, изменяя скорость движения монеты. Объясните полученные результаты.
2. Возьмите два упругих мяча разного размера, положите большой мяч на маленький (рис. 5), расположите мячи над твердой поверхностью и отпустите. Повторите опыт, но на этот раз разместите маленький мяч над большим. Объясните наблюдаемые явления.



Рис. 5

## § 18. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА. ПОДЪЕМНАЯ СИЛА КРЫЛА



Можно ли не очень опытному пловцу попробовать переплыть горную реку? Казалось бы, почему нет, особенно если река не очень широкая. Но этого не стоит делать ни в коем случае — это очень опасно! И дело не в ширине реки, а в том, что, как правило, в горных реках есть стремнины — участки с большой скоростью течения. Выплыть из стремнины очень трудно — она затягивает и «не отпускает» пловца. А вот какое отношение имеет течение реки к подъемной силе крыла самолета, вы узнаете из этого параграфа.

### 1 Где жидкость движется быстрее

Возьмем горизонтальную трубку с разными поперечными сечениями, закрытую поршнем (можно взять шприц без иглы). Наполним трубку водой и будем перемещать поршень с некоторой постоянной скоростью (рис. 18.1). Увидим, что скорость воды в узкой части трубки будет больше, чем в широкой части. Результаты этого опыта можно было бы и спрогнозировать.

Рассмотрим *стационарный поток идеальной несжимаемой жидкости*, то есть поток, в каждой точке которого скорость движения жидкости не изменяется со временем, а силы трения пренебрежимо малы (рис. 18.2). Пусть  $v_1$  — скорость течения в широкой части трубы с площадью сечения  $S_1$ , а  $v_2$  — скорость течения в узкой части трубы с площадью сечения  $S_2$ . За некоторое время  $t$  через эти сечения протекают равные объемы жидкости:

$$V_1 = S_1 \cdot l_1 = S_1 \cdot v_1 t; \quad V_2 = S_2 \cdot l_2 = S_2 \cdot v_2 t,$$

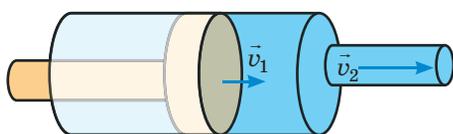
где  $l_1, l_2$  — расстояния, которые проходит жидкость за время  $t$ .

Поскольку  $V_1 = V_2$ , то  $S_1 v_1 t = S_2 v_2 t$ . После сокращения на  $t$  получим **уравнение неразрывности струи**:

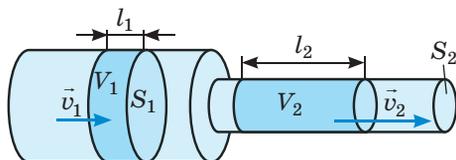
$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Таким образом, и эксперименты, и теоретические исследования подтверждают: *чем меньше площадь сечения, тем быстрее движется жидкость*.

Подобное явление можно наблюдать, если спускаться или подниматься по реке: течение медленное и плавное там, где река глубокая и широкая, а на мелководье или в узкой части русла скорость течения заметно увеличивается.



**Рис. 18.1.** Чем меньше площадь сечения трубки, тем быстрее движется жидкость:  $v_2 > v_1$



**Рис. 18.2.** Если жидкость несжимаема, а поток стационарный, то объемы  $V_1$  и  $V_2$  жидкости, протекающей через сечения  $S_1$  и  $S_2$  за некоторый интервал времени  $t$ , равны:  $V_1 = V_2$

## 2 Как давление внутри жидкости зависит от скорости ее движения

Вернемся к [рис. 18.2](#). Скорость течения в месте перехода из широкой части трубы в узкую увеличивается, то есть жидкость *ускоряет* свое движение. Наличие ускорения означает, что в этом месте на жидкость действует некая сила. Труба расположена горизонтально, поэтому сила, придающая ускорение, не может быть следствием притяжения Земли. Эта сила возникает в результате разности давлений, то есть *давление жидкости в широкой части трубы (где скорость течения меньше) больше давления жидкости в узкой части трубы (где скорость течения больше)*.

Первым к такому выводу пришел швейцарский физик и математик *Даниил Бернулли* (1700–1782), который установил закон, касающийся любого стационарного потока жидкости, — **закон Бернулли**:

При стационарном движении жидкости давление жидкости меньше там, где скорость течения больше, и наоборот, давление жидкости больше там, где скорость течения меньше.

Опираясь на закон Бернулли, объясните, почему трудно переплыть реку, в которой есть участки с большой скоростью течения.

*Закон Бернулли является следствием закона сохранения механической энергии*: жидкость получает кинетическую энергию (увеличивает скорость своего движения) благодаря тому, что потенциальная энергия упругого взаимодействия молекул жидкости уменьшается (и наоборот). Если поток жидкости не горизонтальный, изменение кинетической энергии жидкости происходит еще и за счет изменения ее потенциальной энергии гравитационного взаимодействия с Землей.

## 3 Почему летают самолеты

Садясь в самолет или наблюдая за его полетом, вы, вероятно, задумывались о том, почему самолет поднимается и какая сила удерживает его в воздухе. Кто-то скажет, что это архимедова сила (но это не так, ведь неподвижный самолет не поднимется). Некоторые предположат, что самолет держит сила реактивной тяги двигателей (и это тоже неправильно, ведь эта сила только разгоняет самолет и поддерживает скорость его движения). Самолет держится в воздухе *благодаря силе давления, создающей подъемную силу*.

Возникновение подъемной силы можно объяснить с помощью закона Бернулли, ведь при определенных условиях воздушный поток можно рассматривать как стационарный поток жидкости.

Во время полета на крылья самолета все время набегают встречный поток воздуха, и крылья как бы «разрезают» его на две части: одна часть обтекает верхнюю поверхность крыла, другая — нижнюю. Форма большинства крыльев такова, что поток, обтекающий верхнюю (выпуклую) часть крыла, преодолевает за то же время большее расстояние (движется с большей скоростью), чем поток, обтекающий крыло снизу ([рис. 18.3](#)). Согласно закону Бернулли там, где скорость потока больше, давление меньше. Следовательно, *сила давления, действующая на крыло сверху, меньше силы давления, действующей на крыло снизу*.

Однако самая важная причина образования подъемной силы — это наличие *угла атаки* — наклона крыльев самолета под определенным углом  $\alpha$  к воздушному потоку (рис. 18.4). В таком случае подъемная сила возникает как за счет уменьшения давления над крылом, так и за счет увеличения давления под крылом. Благодаря наличию угла атаки в воздух поднимаются и самолеты с симметричным профилем крыла.

Разницу сил давлений называют *полной аэродинамической силой* (см. рис. 18.4).



### Подводим итоги

- Для стационарного потока жидкости или газа выполняется закон Бернулли: давление жидкости (газа) больше там, где скорость течения меньше, и наоборот.
- Закон Бернулли объясняет одну из причин возникновения подъемной силы крыла самолета: аэродинамическая форма крыла заставляет воздух над его верхней поверхностью двигаться с большей скоростью, поэтому давление над крылом меньше, чем давление под крылом.

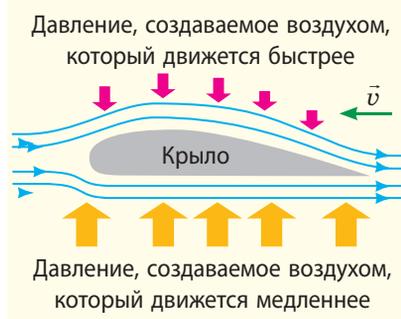


Рис. 18.3. Обычно крыло самолета имеет аэродинамическую форму: верхняя поверхность крыла более выпуклая, чем нижняя. Голубыми стрелками показано движение воздуха, набегающего на крыло, зеленой стрелкой — направление движения самолета

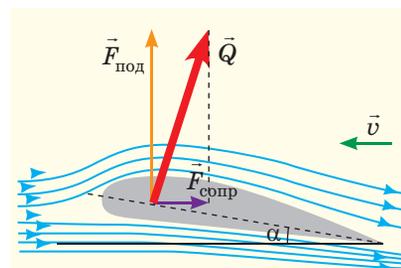


Рис. 18.4. Угол атаки  $\alpha$  и полная аэродинамическая сила  $\vec{Q}$ . Вертикальная составляющая силы  $\vec{Q}$  — подъемная сила  $\vec{F}_{\text{под}}$ , горизонтальная составляющая — сила сопротивления  $\vec{F}_{\text{сопр}}$



### Контрольные вопросы

1. Докажите, что в узкой части трубы скорость течения жидкости больше, чем в широкой части.
2. Опираясь на второй закон Ньютона, докажите, что давление движущейся жидкости в широкой части трубы больше, чем в узкой части.
3. Объясните закон Бернулли на основе закона сохранения механической энергии.
4. Почему возникает подъемная сила крыла самолета?



### Упражнение № 18

1. Почему притягиваются два судна, движущиеся с большими скоростями рядом друг с другом?
2. Почему сильный ураганный ветер иногда срывает крыши домов?
3. Объясните, как работает пульверизатор (рис. 1).
4. Почему мяч, которому придали вращение, изменяет траекторию своего движения (рис. 2)? Кстати, это явление называют *эффектом Магнуса*.



Рис. 1



Рис. 2

- Вы знаете, что в сообщающихся сосудах неподвижная однородная жидкость устанавливается на одном уровне. Почему, если жидкость движется, то ее уровни в сообщающихся сосудах разные (рис. 3)?
- Проанализируйте информацию в рубрике «Физика в цифрах» в конце § 18 и приведите подобные примеры, воспользовавшись дополнительными источниками информации.

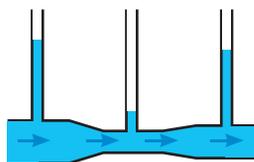


Рис. 3



### Экспериментальные задания

- Возьмите лист бумаги и подуйте на него так, как показано на рис. 4. Объясните наблюдаемое явление.
- Возьмите фен и мячик для пинг-понга. Включите фен, направьте струю воздуха вертикально вверх и положите на нее мячик. Мячик не упадет, а будет колебаться внутри струи. Если наклонить фен, то мячик падать не будет, а будет втягиваться в струю. Объясните наблюдаемые явления.



Рис. 4

### Физика в цифрах

Форма и размер крыльев самолетов зависят от их назначения: чем длиннее крылья, тем устойчивее самолет, но ему труднее поворачивать; более маневренные самолеты имеют короткие крылья.

#### ■ СУ-27

Один из основных самолетов Воздушных сил ВС Украины. Размах крыльев — 14,7 м. Максимальная скорость — 2125 км/ч.



Короткие расширенные крылья позволяют самолету выполнять в воздухе резкие повороты

#### ■ АН-225 «Мрия»

Самый большой и самый мощный в мире транспортный самолет. Разработан Киевским КБ им. О. К. Антонова и построен на Киевском механическом заводе в 1980-х гг. Размах крыльев — 88,4 м. Максимальная скорость — 850 км/ч.



Чем на большую грузоподъемность рассчитан самолет, тем длиннее его крылья

#### ■ Sikorsky R-4 Hoverfly

Первый серийный вертолет в мире (с 1943 г. выпускался в США, а с 1944 г. — в Великобритании). Спроектирован под руководством Игоря Ивановича Сикорского (родился в 1889 г. в Киеве, окончил Киевский политехнический институт). Диаметр несущего винта — 11,6 м, максимальная скорость — 132 км/ч.



«Крылья» вертолета вращаются, поэтому для создания подъемной силы ему не нужен разбег. Вертолет может зависать в воздухе, двигаться в стороны и назад

**Тема.** Исследование движения связанных тел.

**Цель:** определить коэффициент трения скольжения дерева по дереву.

**Оборудование:** рулетка, весы или динамометр, секундомер, трибометр, неподвижный блок, деревянный брусок, груз массой 100 г, прочная нить длиной 1,5–2 м.

**УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ**

**II Подготовка к эксперименту**

1. Измерьте массу  $m_1$  бруска 1.
2. Соберите экспериментальную установку (см. рис. 1).
3. Докажите: если брусок 1 начинает движение под действием груза 2, их ускорения можно определить по формуле:  $a = \frac{2H}{t^2}$  (1).
4. Для каждого тела запишите уравнение второго закона Ньютона и, учитывая, что  $T_1 = T_2$ , а  $F_{тр. ск} = \mu N$ , докажите, что  $\mu = \frac{m_2 g - (m_1 + m_2) a}{m_1 g}$  (2).

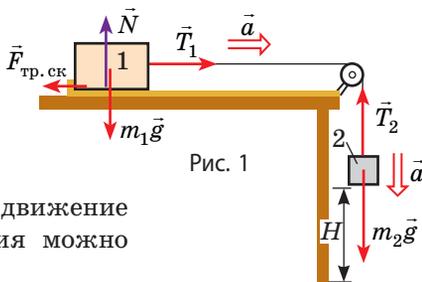


Рис. 1

**Эксперимент**

Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.

1. Расположите брусок у левого края трибометра и, удерживая брусок, измерьте расстояние  $H$  от груза до пола (см. рис. 1).
2. Отпустив брусок, измерьте время  $t$ , через которое груз коснется пола. Не изменяя начального расположения связанных тел, повторите опыт еще три раза.

Номер опыта	Масса бруска $m_1$ , кг	Масса груза $m_2$ , кг	Высота падения груза $H$ , м	Время падения		Ускорение груза $a_{ср}$ , м/с <sup>2</sup>	Коэффициент трения скольжения $\mu_{ср}$	Относительная погрешность $\varepsilon$ , %
				$t$ , с	$t_{ср}$ , с			

**Обработка результатов эксперимента**

1. Определите среднее время движения груза ( $t_{ср}$ ).
2. По формуле (1) найдите среднее ускорение движения груза ( $a_{ср}$ ); по формуле (2) — среднее значение коэффициента трения скольжения.
3. Оцените относительную погрешность эксперимента, сравнив значение коэффициента трения скольжения  $\mu_{ср}$  дерева по дереву, полученное

в ходе эксперимента, с табличным значением  $\mu_{табл}$ :  $\varepsilon_{\mu} = \left| 1 - \frac{\mu_{ср}}{\mu_{табл}} \right| \cdot 100\%$ .

**Анализ эксперимента и его результатов**

Проанализируйте эксперимент и его результаты. В выводе укажите: 1) величину, которую вы измеряли; 2) результат измерения; 3) причины погрешности.

**+ Творческое задание**

Запишите план проведения эксперимента по определению ускорения свободного падения с использованием установки, изображенной на рис. 2. По возможности проведите эксперимент.

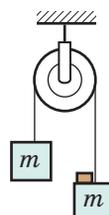


Рис. 2



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

**Тема.** Определение центра масс плоской фигуры.

**Цель:** ознакомиться с методами определения центра масс (центра тяжести); определить центр тяжести пластины двумя методами: экспериментальным и геометрическим.

**Оборудование:** штатив с муфтой и лапкой, картон, ножницы, тонкий гвоздь, шило, гайка (или другой небольшой груз), нить длиной 30–40 см, линейка.

### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

#### II Подготовка к эксперименту

1. Вырежьте из картона плоскую фигуру, имеющую форму трапеции (см. [рис. 1](#)).
2. В трех углах трапеции сделайте шилом отверстия, диаметры которых немного больше диаметра гвоздя.
3. Изготовьте отвес: к одному концу нити привяжите гайку, на другом конце сделайте петельку.

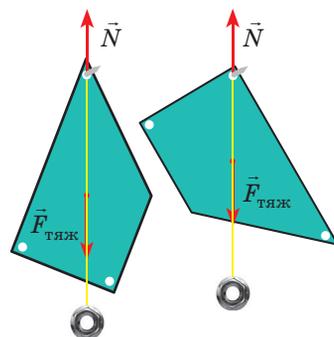


Рис. 1

#### ▶ Эксперимент 1. Определение центра масс экспериментальным методом

1. Закрепите гвоздь горизонтально в лапке штатива так, чтобы острый конец гвоздя был свободен; подвесьте на гвоздь фигуру и отвес.
2. После того как колебания фигуры и отвеса прекратятся, карандашом поставьте вдоль нити отвеса на картоне 2–3 точки.
3. Снимите фигуру и проведите через поставленные точки прямую.
4. Повторите действия еще для двух отверстий. Убедитесь, что все три прямые пересеклись в одной точке. Эта точка и есть центр масс фигуры.

#### ▶ Эксперимент 2. Определение центра масс геометрическим методом

*Обратите внимание:* фигуру используем ту же; построения лучше выполнять на ее оборотной стороне.

1. Разбейте фигуру на параллелограмм и треугольник, найдите их центры масс (точки  $O_1$  и  $O_2$  на [рис. 2, а](#)). Центр масс параллелограмма — в точке пересечения его диагоналей, треугольника — в точке пересечения его медиан.
2. Разбейте фигуру на два треугольника и найдите их центры масс (точки  $O_3$  и  $O_4$  на [рис. 2, б](#)).
3. Постройте отрезки  $O_1O_2$  и  $O_3O_4$ . Точка их пересечения — центр масс фигуры.

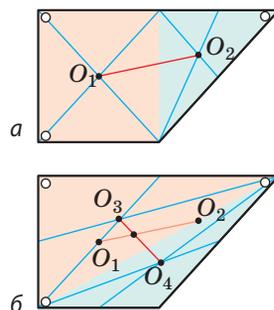


Рис. 2

#### □ Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. В выводе укажите: 1) что вы определяли, какими методами; 2) какой метод более универсален; 3) совпали ли полученные результаты; если нет, то в чем причины погрешности.

#### + Творческое задание

Предложите как минимум два способа, чтобы убедиться в том, что найденная вами точка действительно является центром масс фигуры.

# ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА I «МЕХАНИКА».

## Часть 2. Динамика и законы сохранения

1. Вы вспомнили важнейшие законы динамики — законы *Ньютона*.

### Первый закон Ньютона

постулирует наличие инерциальных систем отсчета

### Второй закон Ньютона

основной закон динамики:  $\vec{a} = \vec{F} / m$

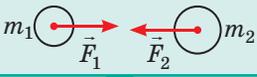
### Третий закон Ньютона

закон взаимодействия:  
 $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

2. Вы углубили свои знания о разных видах сил в механике.

### Гравитационные

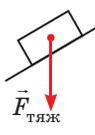
Сила всемирного тяготения:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$



Сила тяжести

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}$$



### СИЛЫ В МЕХАНИКЕ

#### Сила трения

Сила трения покоя:  
 $F_{\text{тр. пок}} = F_{\text{внеш}}$

Сила трения скольжения:  
 $F_{\text{тр. ск}} = \mu N$

Сила сопротивления среды зависит от формы, размеров и скорости движения тела, плотности и вязкости среды

### Электромагнитные

Сила упругости:

$$F_{\text{упр. x}} = -kx$$

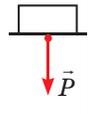
Вес тела

•  $P = mg$ , если  $a = 0$

•  $P = m(g + a)$ , если  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{g}$

•  $P = m(g - a)$ , если  $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{g}$

•  $P = 0$ , если  $\vec{a} = \vec{g}$



3. Вы исследовали условия равновесия тел, ознакомились с видами равновесия.

### Условия равновесия тела

Силы, действующие на тело, скомпенсированы:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$

Сумма моментов сил равна нулю:  $M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0$ , где  $M = Fl$

4. Вы вспомнили такие физические величины, как *механическая работа*, *механическая энергия*, *мощность*.

### Механическая работа

мера действия силы на тело:  
 $A = Fscos\alpha$

### Мощность

скорость совершения работы:  
 $P = \frac{A}{t}$ ;  $P = F_x v$

### Механическая энергия

характеризует способность тела совершать работу

Потенциальная энергия — энергия взаимодействия

$E_p$  поднятого тела:  $E_p = mgh$

$E_p$  упруго деформированного тела:  $E_p = kx^2/2$

Кинетическая энергия — энергия движения:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

**Закон сохранения механической энергии:** в замкнутой системе тел, взаимодействующих только консервативными силами, полная механическая энергия сохраняется:  $E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$

5. Вы сформулировали второй закон Ньютона «на языке» импульса и вспомнили закон сохранения импульса.

Изменение импульса тела равно импульсу силы:  $\Delta \vec{p} = \vec{F}t$

импульс тела:  
 $\vec{p} = m\vec{v}$

импульс силы:  
 $\vec{F}t$

**Закон сохранения импульса:** в замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел системы остается неизменной после любых взаимодействий тел этой системы друг с другом:  $\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + \dots + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n$

# ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ I «МЕХАНИКА».

## Часть 2. Динамика и законы сохранения

Задания 1, 2, 4–6 содержат только один правильный ответ.

1. (1 балл) В каком случае (рис. 1) тело находится в состоянии неустойчивого равновесия?

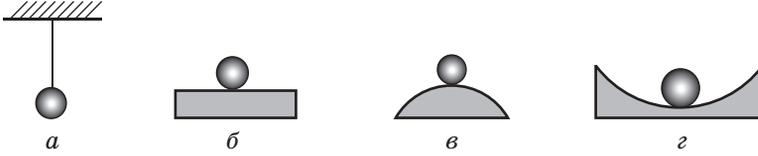


Рис. 1

2. (1 балл) Какие физические величины не изменяются в результате упругого удара двух тел?

а) скорости движения тел; в) кинетические энергии тел;  
б) импульсы тел; г) кинетическая энергия и импульс системы тел.

3. (2 балла) Установите соответствие между физической величиной и выражением для ее определения.

1 Кинетическая энергия 2 Сила упругости 3 Сила трения 4 Импульс тела  
А  $\mu N$  Б  $mv$  В  $kx$  Г  $kx^2/2$  Д  $mv^2/2$

4. (2 балла) Тело массой 4 кг движется вдоль оси  $Ox$ , при этом его координата изменяется по закону:  $x = 0,5 + 2t + 5t^2$ . Определите модуль равнодействующей сил, действующих на тело.

а) 2 Н; б) 8 Н; в) 20 Н; г) 40 Н.

5. (2 балла) Тело движется с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$  под действием двух взаимно перпендикулярных сил 6 и 8 Н. Определите массу тела.

а) 1 кг; б) 5 кг; в) 7 кг; г) 20 кг.

6. (2 балла) На полу лифта стоит чемодан массой 20 кг. Лифт начинает подниматься с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Определите вес чемодана.

а) 20 Н; б) 160 Н; в) 200 Н; г) 240 Н.

7. (3 балла) В результате удлинения пружины на 2,0 см возникла сила упругости 3 Н. Определите потенциальную энергию пружины. При каком удлинении пружины сила упругости будет равна 15 Н?

8. (3 балла) Брусок массой 500 г под действием подвешенного к нему груза массой 150 г преодолел от начала движения путь 80 см за 2 с (рис. 2). Найдите коэффициент трения скольжения.

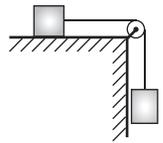


Рис. 2

9. (4 балла) Автомобиль массой 3 т движется в гору, развивая силу тяги 3 кН. Определите, с каким ускорением движется автомобиль, если коэффициент сопротивления движению 0,04, а уклон дороги — 0,03.

10. (4 балла) Тело массой 0,2 кг, движущееся со скоростью 12 м/с, догоняет тело массой 0,4 кг, движущееся со скоростью 3 м/с. Какое количество теплоты выделится в результате абсолютно неупругого удара этих тел?

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, выполненные правильно, подсчитайте сумму баллов. Разделите эту сумму на два. Полученное число соответствует уровню ваших учебных достижений.



Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой вы найдете на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».

# ЧАСТЬ 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

## § 19. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ



Механические колебания окружают нас повсюду: покачивание ветвей деревьев, вибрация струн музыкальных инструментов, колебания поплавка на волне, движение маятника в часах, биение сердца и т. д. Колебательное движение, одно из самых распространенных в природе, имеет ряд характерных признаков, о которых вы вспомните в этом параграфе.

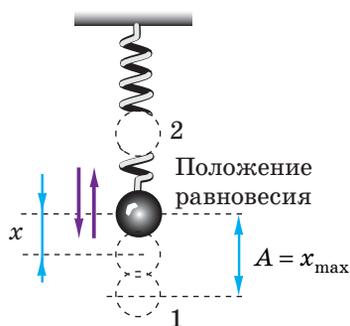
### 1 Какие физические величины характеризуют колебательное движение

**Механические колебания** — это движения тела (или системы тел), происходящие около некоторого положения равновесия и точно или приблизительно повторяющиеся через равные интервалы времени.

Колебательное движение, как и любое другое движение, характеризуется такими физическими величинами, как *скорость, ускорение, координата (смещение)*.

**Смещение  $x$**  — это расстояние от положения равновесия до точки, в которой в данный момент времени находится колеблющееся тело.

При колебаниях механическое состояние тела непрерывно изменяется. Если координата и скорость движения тела повторяются через равные интервалы времени, такие колебания называют *периодическими*. Существует ряд физических величин, характеризующих именно периодические колебания, в частности *амплитуда, период, частота* (см. [рис. 19.1](#), [таблицу](#)).



**Рис. 19.1.** Груз на пружине совершает периодические колебания ( $x$  — смещение груза;  $A$  — амплитуда колебаний). Интервал времени, за который груз переместился из положения 1 в положение 2 и обратно (время одного колебания), — период колебаний  $T$

*Физические величины, характеризующие периодические колебания*

Амплитуда колебаний $A$	Период колебаний $T$	Частота колебаний $\nu$
Наибольшее расстояние, на которое отклоняется тело от положения равновесия $A = x_{\max}$	Время одного колебания: $T = \frac{t}{N}$	Количество колебаний за единицу времени: $\nu = \frac{N}{t}$
	где $N$ — количество колебаний за время $t$	
Единица амплитуды колебаний в СИ — метр: $[A] = 1 \text{ м (m)}$	Единица периода колебаний в СИ — секунда: $[T] = 1 \text{ с (s)}$	Единица частоты колебаний в СИ — герц: $[\nu] = 1 \text{ Гц (Hz)}$ .
	Частота и период колебаний связаны соотношением: $\nu = \frac{1}{T}$	

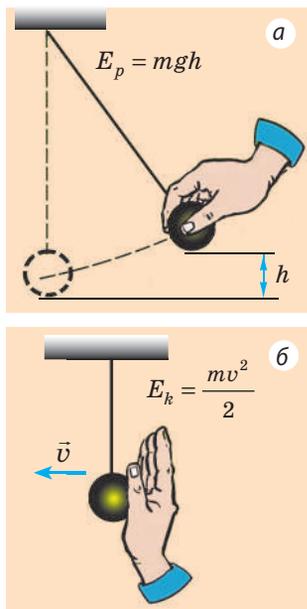
## 2 Незатухающие и затухающие колебания

Рассмотрим колебания груза на пружине (рис. 19.1). Если бы в системе «груз — пружина — Земля» не было потерь механической энергии, то колебания продолжались бы сколь угодно долго, а их амплитуда со временем не изменялась бы. *Колебания, амплитуда которых со временем не изменяется, называют незатухающими.*

Однако в любой системе всегда есть потери механической энергии. Энергия расходуется на преодоление сил трения, на деформацию тел во время колебаний. В результате механическая энергия постепенно переходит во внутреннюю. Поэтому, если система не получает энергию извне, то амплитуда колебаний постепенно уменьшается и спустя некоторое время колебания прекращаются (затухают). *Колебания, амплитуда которых со временем уменьшается, называют затухающими.*

## 3 Свободные и вынужденные колебания, автоколебания

Существуют колебания, которые происходят без внешнего периодического воздействия. Таковы, например, колебания подвешенного на нити или на пружине шара, возникающие после того, как шар отклонили от положения равновесия и отпустили. Такие колебания называют *свободными*.



**Рис. 19.2.** Чтобы в колебательной системе возникли свободные колебания, необходимо вывести ее из положения равновесия — сообщить потенциальную (а) или кинетическую (б) энергию

**Свободные колебания** — это колебания, происходящие под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из положения равновесия.

Частота свободных колебаний определяется свойствами самой системы (см. § 20).

Систему тел, в которой могут возникать свободные колебания, называют *колебательной системой*. Характерная черта колебательной системы — наличие *положения устойчивого равновесия*, около которого и происходят свободные колебания. Чтобы в колебательной системе возникли свободные колебания, необходимо выполнение двух условий:

- системе должна быть передана избыточная энергия (рис. 19.2);
- трение в системе должно быть достаточно малым, иначе колебания быстро затухнут или даже не возникнут.

При свободных колебаниях система не получает энергию извне, поэтому *свободные колебания — это всегда затухающие колебания*. Чем больше трение в системе, тем быстрее затухают колебания. Например, в воздухе колебания тела на пружине длятся достаточно долго, а в воде быстро затухают (на этом явлении основана работа гидравлических амортизаторов автомобилей (рис. 19.3)).

Существуют колебания (движение воздуха в духовых инструментах, поршня — в двигателе внутреннего сгорания и т. д.), которые совершаются, только когда на тело действуют периодически изменяющиеся внешние силы. Такие колебания называют *вынужденными*.

**Вынужденные колебания** — это колебания, происходящие в системе в результате действия внешней периодически изменяющейся силы.

? Какая сила, изменяясь периодически, заставляет вашу ладонь совершать вынужденные колебания (см. рис. 19.4)?

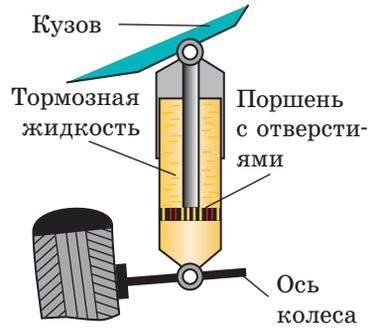
Вынужденные колебания — это обычно *незатухающие колебания*, частота которых равна частоте изменения внешней силы, вынуждающей тело колебаться.

Есть системы, в которых незатухающие колебания существуют не благодаря периодическому внешнему воздействию, а в результате способности таких систем самим регулировать поступление энергии от постоянного (не периодического) источника. Такие системы называют *автоколебательными*, а незатухающие колебания в таких системах — *автоколебаниями*.

Незатухающие колебания, происходящие в системе за счет поступления энергии от постоянного источника, которое регулируется самой системой, называют **автоколебаниями**.

Частота автоколебаний, как и частота свободных колебаний, определяется свойствами самой системы. Примером механической автоколебательной системы может быть храповый механизм маятниковых часов (рис. 19.5).

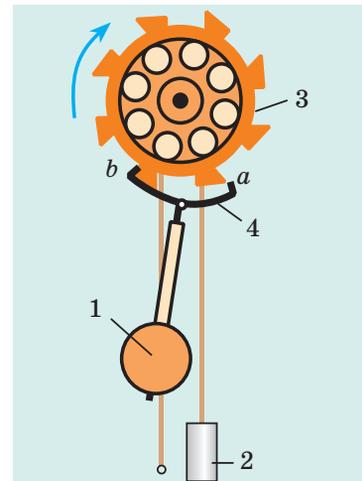
Практически в любой автоколебательной системе можно выделить три характерных элемента: *колебательную систему*, в которой могут происходить свободные колебания (в нашем примере это маятник 1 часов), *источник энергии* (поднятая гиря 2, которая поворачивает храповое колесо 3), *устройство обратной связи*, регулирующее поступление энергии от источника определенными порциями (анкер 4, посредством которого маятник «руководит», в какой момент гиря передает энергию храповому колесу).



**Рис. 19.3.** С кузовом автомобиля соединяют поршень, который во время колебаний движется в цилиндре, заполненном жидкостью; значительное сопротивление жидкости приводит к затуханию колебаний



**Рис. 19.4.** К заданию в § 19



**Рис. 19.5.** Когда маятник 1 приближается к крайнему левому положению, палета *b* цепляется за зуб храпового колеса 3 и маятник получает толчок влево, приобретая дополнительную энергию

#### 4 Гармонические колебания

По характеру зависимости смещения (координаты)  $x$  тела от времени  $t$  его колебаний различают *гармонические и негармонические колебания*. Как правило, зависимость  $x(t)$  достаточно сложная (рис. 19.6).

Рассмотрим график колебаний тела на пружине (рис. 19.6, в). Кривая, изображенная на графике, — косинусоида.

Колебания, при которых координата  $x$  колеблющегося тела изменяется с течением времени  $t$  по закону косинуса (или синуса), называют **гармоническими колебаниями**:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ или } x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

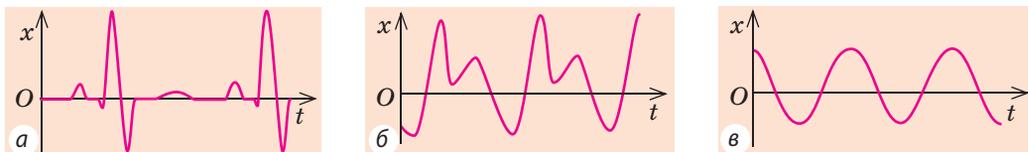
Данные уравнения называют *уравнениями гармонических колебаний*. Выясним, что означает в этих уравнениях каждая величина.

$A$ — <i>амплитуда колебаний</i> : $x_{\max} = A$ (поскольку наибольшее значение косинуса и синуса равно 1).
$\omega t + \varphi_0$ — <i>фаза колебаний</i> : $\varphi = \omega t + \varphi_0$ — величина, однозначно определяющая механическое состояние тела в данный момент времени.
$\varphi_0$ — <i>начальная фаза колебаний</i> — фаза колебаний в момент начала отсчета времени (если $t = 0$ , то $\varphi = \omega t + \varphi_0 = \varphi_0$ ).
$\omega$ — <i>циклическая частота</i> : $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , где $T$ — период колебаний. (Косинус, как и синус, — функция периодическая, то есть $\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\pi)$ ; колебания полностью повторяются через время, равное периоду $T$ колебаний, поэтому $\cos(\omega t + \varphi_0) = \cos(\omega(t+T) + \varphi_0)$ . Таким образом: $\omega t + \varphi_0 + 2\pi = \omega t + \omega T + \varphi_0 \Rightarrow \omega = 2\pi/T$ ). Единица циклической частоты в СИ — <b>радиан в секунду</b> (рад/с, или $\text{с}^{-1}$ ) ( $\text{rad/s, s}^{-1}$ ).

*Обратите внимание!* Если координата тела изменяется по гармоническому закону (по закону косинуса или синуса), скорость и ускорение движения тела тоже изменяются гармонически. При этом выполняются соотношения:

$$v_{\max} = \omega x_{\max}; \quad a_{\max} = \omega^2 x_{\max}; \quad a_x = -\omega^2 x$$

И наоборот: если в любой момент времени движения тела его ускорение прямо пропорционально смещению и направлено в сторону, противоположную смещению, то такое движение представляет собой гармонические колебания.



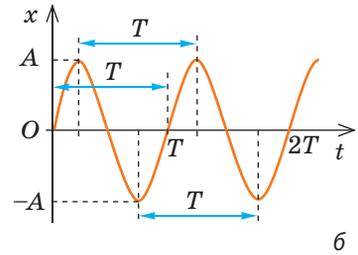
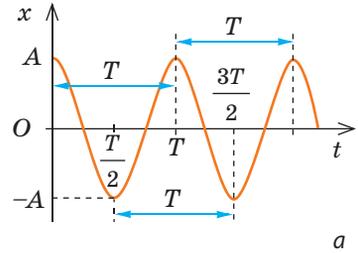
**Рис. 19.6.** Графики зависимости смещения  $x$  тела (или части тела) от времени  $t$  колебаний: а — грудная клетка при сердечных толчках (кардиограмма); б — мембрана динамика при излучении звуковой волны; в — тело на пружине

*Обратите внимание!*

- Если начало отсчета времени ( $t = 0$ ) совпадает с моментом максимального отклонения тела от положения равновесия ( $x_0 = x_{\max} = A$ ), то уравнение колебаний удобнее записывать в виде:  $x_0 = A \cos \omega t$  (рис. 19.7, а).

- Если начало отсчета времени ( $t = 0$ ) совпадает с моментом прохождения телом положения равновесия ( $x_0 = 0$ ), то уравнение колебаний удобнее записывать в виде:  $x = A \sin \omega t$  (рис. 19.7, б).

- По графику колебаний (как и по уравнению колебаний) легко определить физические величины, характеризующие колебательное движение (см. п. 5 § 19).



**Рис. 19.7.** Графики гармонических колебаний ( $A$  — амплитуда колебаний;  $T$  — период колебаний). Координата колеблющегося тела изменяется в зависимости от времени  $t$  по закону:  $x = A \cos \omega t$  (а);  $x = A \sin \omega t$  (б)

### 5 Учимся решать задачи

**Задача.** По графику определите амплитуду и период колебаний тела. Вычислите циклическую частоту и максимальную скорость движения тела. Запишите уравнение колебаний. Найдите смещение тела в фазе  $\frac{\pi}{2}$  рад.

Дано:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$A$  — ?

$T$  — ?

$\omega$  — ?

$v_{\max}$  — ?

$x(t)$  — ?

$x\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right)$  — ?

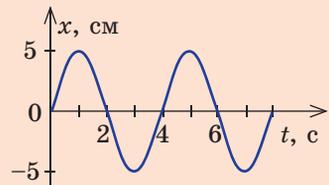
**Решение.** График колебаний — синусоида, поэтому уравнение колебаний имеет вид:  $x = A \sin \omega t$ . Из графика видим: максимальное смещение тела равно 5 см:  $A = x_{\max} = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$ ; тело совершает одно полное колебание за 4 с, следовательно,  $T = 4 \text{ с}$ .

Найдем циклическую частоту и максимальную скорость движения тела:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,5\pi \text{ (с}^{-1}\text{)}$ ;  $v_{\max} = \omega x_{\max} = 0,025\pi \text{ (м/с)}$ .

Подставим значения  $A = 0,05 \text{ м}$  и  $\omega = 0,5\pi \text{ с}^{-1}$  в уравнение колебаний:  $x = 0,05 \sin 0,5\pi t \text{ (м)}$ .

Если  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , то  $x = A \sin \varphi = 0,05 \sin \frac{\pi}{2} = 0,05 \text{ (м)}$ .

**Ответ:**  $A = 0,05 \text{ м}$ ;  $T = 4 \text{ с}$ ;  $\omega = 0,5\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $v_{\max} = 0,025\pi \text{ м/с}$ ;  $x = 0,05 \sin 0,5\pi t \text{ (м)}$ ;  $x = 0,05 \text{ м}$ .



### Подводим итоги

- Движения, точно или приблизительно повторяющиеся через одинаковые интервалы времени, называют механическими колебаниями.
- Колебания, амплитуда которых со временем не изменяется, называют незатухающими; колебания, амплитуда которых со временем уменьшается, — затухающими.

• Колебания, происходящие в системе в результате действия периодически изменяющейся внешней силы, называют вынужденными, а происходящие под действием только внутренних сил системы, — свободными.

• Незатухающие колебания, происходящие в системе за счет поступления энергии от постоянного (не периодического) источника, которое регулируется самой системой, называют автоколебаниями.

• Колебания, в процессе которых смещение  $x$  колеблющегося тела изменяется с течением времени  $t$  по закону косинуса (или синуса), называют гармоническими. В общем случае уравнение гармонических колебаний имеет вид:  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ , или  $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , где  $A$  — амплитуда колебаний;  $\omega t + \varphi_0$  — фаза колебаний  $\varphi$ ;  $\varphi_0$  — начальная фаза;  $\omega$  — циклическая частота.

### Контрольные вопросы



1. Назовите основные физические величины, характеризующие колебательное движение. Дайте их определения.
2. Почему при наличии трения амплитуда свободных колебаний постепенно уменьшается? Как называют такие колебания?
3. Какие колебания называют свободными? вынужденными? Приведите примеры.
4. Какие условия необходимы для возникновения свободных колебаний?
5. Назовите характерные элементы автоколебательной системы.
6. В чем сходство свободных колебаний и автоколебаний? автоколебаний и вынужденных колебаний? Чем они отличаются?
7. Какие колебания называют гармоническими? Запишите уравнение гармонических колебаний.
8. Как выглядит график гармонических колебаний?



### Упражнение № 19

1. Вспомните примеры колебаний из повседневной жизни. Какие это колебания — затухающие или незатухающие, свободные или вынужденные? Обсудите свой ответ.
2. Период колебаний груза на пружине равен 2 с. Что это означает? 1) Определите частоту и циклическую частоту колебаний груза. 2) Сколько колебаний совершит груз за 10 с? 3) Какой путь пройдет груз за 3 с, если амплитуда колебаний — 5 см?
3. Уравнение колебаний тела имеет вид  $x = 0,4 \sin \frac{2\pi}{3} t$  (м). Определите амплитуду, период и частоту колебаний тела. Найдите максимальную скорость и максимальное ускорение движения тела.
4. Запишите уравнение гармонических колебаний для тела, если амплитуда его колебаний 10 см, а период колебаний — 1 с. Считайте, что в момент начала наблюдения тело было максимально отклонено от положения равновесия.
5. На рис. 1 и 2 приведены графики гармонических колебаний двух тел. Для каждого тела: а) определите амплитуду колебаний; б) период колебаний; в) частоту колебаний; г) запишите уравнение колебаний.
6. Докажите, что сердце и легкие живых существ можно отнести к автоколебательным системам. Где в повседневной жизни мы сталкиваемся с такими системами? При необходимости воспользуйтесь дополнительными источниками информации.

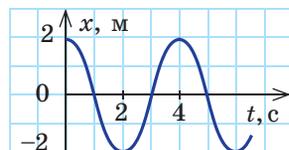


Рис. 1

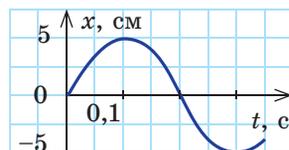


Рис. 2

## § 20. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ И ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИКИ. ЭНЕРГИЯ КОЛЕБАНИЙ



Колебательные движения очень разнообразны. При этом существует «классика» колебательных движений — они описаны сотни лет назад, их изучением занимались *Галилео Галилей* (1564–1642) и *Христиан Гюйгенс* (1629–1695). Это колебания пружинного и математического маятников. Именно о них пойдет речь в данном параграфе.

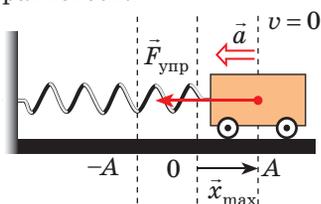
### 1 Колебания пружинного маятника

**Пружинный маятник** — это колебательная система, представляющая собой закрепленное на пружине тело.

Рассмотрим колебания *горизонтального пружинного маятника* — тележки массой  $m$ , закрепленной на пружине жесткостью  $k$ . Будем считать, что силы трения, действующие в системе, пренебрежимо малы, а значит, колебания маятника незатухающие (их амплитуда с течением времени не изменяется, а полная механическая энергия системы сохраняется). При этом потенциальная энергия деформированной пружины будет превращаться в кинетическую энергию движения тележки, и наоборот.

#### Колебания пружинного маятника

1. Состояние максимального отклонения от положения равновесия



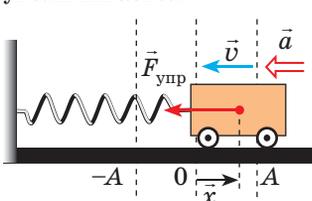
$$v = 0; \quad x = x_{\max}; \quad E = E_{p \max}$$

Отведем тележку на расстояние  $x_{\max}$  вправо от положения равновесия — пружина растянута, и на тележку действует сила упругости, направленная влево; в данный момент эта сила максимальна:  
 $F_{\text{упр}} = kx_{\max}$ .

Тележка неподвижна, поэтому ее кинетическая энергия равна нулю:  $E_k = 0$ . Потенциальная энергия пружины максимальна и равна полной энергии маятника:

$$E_p = \frac{kx_{\max}^2}{2}.$$

2. Ускоренное движение тележки, скорость движения увеличивается



$$v \uparrow; \quad x \downarrow; \quad F_{\text{упр}} \downarrow \Rightarrow a \downarrow; \\ E = E_k + E_p$$

Отпустим тележку — под действием силы упругости она начинает движение влево. Сила  $\vec{F}_{\text{упр}}$  направлена в сторону движения тележки, поэтому скорость тележки увеличивается. При этом удлинение  $x$  пружины уменьшается, поэтому уменьшается сила упругости и, следовательно, ускорение движения тележки.

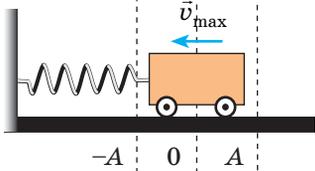
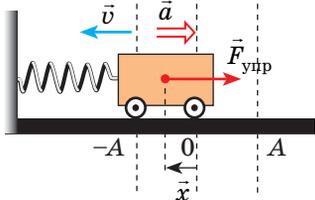
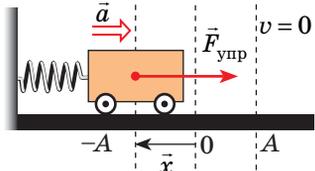
Кинетическая энергия тележки возрастает;

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенциальная энергия пружины уменьшается;

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

Полная энергия системы остается неизменной и равна сумме кинетической и потенциальной энергий.

<p><b>3. Состояние равновесия</b></p>  <p><math>F_{\text{упр}} = 0; a = 0; v = v_{\text{max}};</math>  <math>x = 0; E = E_{k\text{max}}</math></p>	<p>Через время, равное четверти периода (<math>t = T/4</math>), тележка доходит до положения равновесия. В этот момент сила упругости и ускорение равны нулю, а скорость движения тележки достигает максимального значения.</p>	<p>Потенциальная энергия пружины равна нулю: <math>E_p = 0</math>. Кинетическая энергия тележки максимальна и равна полной энергии системы:</p> $E_k = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$
<p><b>4. Замедленное движение тележки, скорость движения уменьшается</b></p>  <p><math>v \downarrow; x \uparrow; F_{\text{упр}} \uparrow \Rightarrow a \uparrow;</math>  <math>E = E_k + E_p</math></p>	<p>Достигнув положения равновесия, тележка не останавливается, а вследствие инертности продолжает движение влево. Пружина начинает сжиматься, и растущая сила упругости тормозит движение тележки.</p>	<p>Кинетическая энергия тележки уменьшается;</p> $E_k = \frac{mv^2}{2}.$ <p>Потенциальная энергия пружины возрастает;</p> $E_p = \frac{kx^2}{2}.$ <p>Полная энергия системы равна сумме кинетической и потенциальной энергий.</p>
<p><b>5. Состояние максимального отклонения от положения равновесия</b></p>  <p><math>v = 0;  x  = x_{\text{max}};</math>  <math>F_{\text{упр}} = kx_{\text{max}}; E = E_{p\text{max}}</math></p>	<p>Достигнув точки поворота (максимального отклонения от положения равновесия), тележка на мгновение останавливается. В этот момент сила упругости достигает максимального значения. С момента начала колебания прошла половина периода (<math>t = T/2</math>).</p>	<p>Тележка неподвижна, поэтому ее кинетическая энергия равна нулю: <math>E_k = 0</math>. Потенциальная энергия пружины максимальна и равна полной энергии системы:</p> $E_p = \frac{kx_{\text{max}}^2}{2}.$
<p>Следующую половину периода характер движения тележки будет таким же, только в обратном направлении: тележка начнет двигаться вправо, к положению равновесия, увеличивая скорость; через время <math>t = \frac{3}{4}T</math> от начала колебания она пройдет положение равновесия и далее снова отклонится на расстояние <math>x_{\text{max}}</math>. Так завершится одно полное колебание (<math>t = T</math>). Далее все повторится.</p>		

**Обратите внимание!** В течение всего времени колебания сила упругости направлена в сторону, противоположную смещению тележки, — сила упругости все время «толкает» тележку к положению равновесия.

Итак, *причины свободных колебаний пружинного маятника:*

- 1) действующая на тело сила всегда направлена к положению равновесия;
- 2) колеблющееся тело инертно, поэтому оно не останавливается в положении равновесия (когда равнодействующая сил становится равной нулю), а продолжает движение в том же направлении.

## 2 Как вычислить период колебаний пружинного маятника

Рассмотрим колебания тележки, закрепленной на горизонтальной пружине, с точки зрения второго закона Ньютона (рис. 20.1). Запишем уравнение второго закона Ньютона в векторном виде:  $\vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$ .

Сила тяжести и сила нормальной реакции опоры уравновешивают друг друга, поэтому  $\vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}$ . Спроецировав это уравнение на ось  $OX$  ( $F_{\text{упр}x} = ma_x$ ) и воспользовавшись законом Гука ( $F_{\text{упр}x} = -kx$ ), получим:  $a_x = -\frac{k}{m}x$ .

Последнее уравнение можно записать в виде  $a_x = -\omega^2 x$ . Таким образом, колебания тележки на пружине являются гармоническими колебаниями, а циклическая частота этих колебаний равна:  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Приняв во внимание, что  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , получим формулу для вычисления периода колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

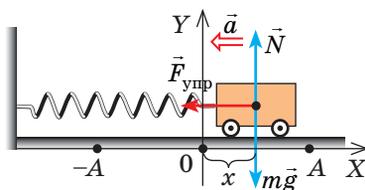
*Обратите внимание!* Период колебаний пружинного маятника не зависит ни от амплитуды колебаний, ни от места расположения маятника (на поверхности Земли или Луны, в космическом корабле и т. д.), — он определяется только характеристиками самой колебательной системы «тело — пружина». Если период  $T$  колебаний тела и жесткость  $k$  пружины известны, можно найти массу  $m$  тела. Такой способ определения массы используют в состоянии невесомости, когда обычные весы не работают.

## 3 Что называют математическим маятником

Любое твердое тело, которое совершает или может совершать колебания относительно оси, проходящей через точку подвеса, называют *физическим маятником*. Примером может быть игрушка, подвешенная на нити в салоне автомобиля. Если игрушку вывести из положения равновесия, она начнет колебаться. Однако изучать такие колебания сложно: их характер определяется размерами и формой игрушки, свойствами нити и другими факторами.

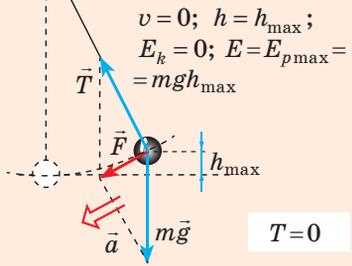
Чтобы размеры тела не влияли на характер его колебаний, следует взять нить, длина которой намного больше размеров тела, а масса незначительна по сравнению с его массой. В таком случае тело можно считать *материальной точкой*. А чтобы во время колебаний тело все время находилось на одинаковом расстоянии от точки подвеса, нить должна быть нерастяжимой. Таким образом будет получена *физическая модель* — *математический маятник*.

**Математический маятник** — это физическая модель колебательной системы, состоящая из материальной точки, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити, и гравитационного поля.

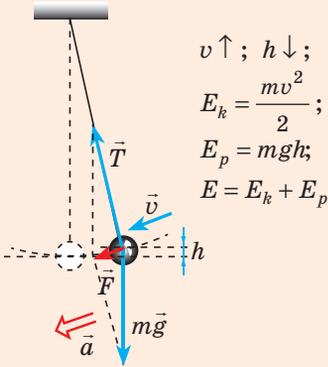


**Рис. 20.1.** На тележку, отклоненную от положения равновесия, действуют три силы: сила  $\vec{N}$  реакции опоры, сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$

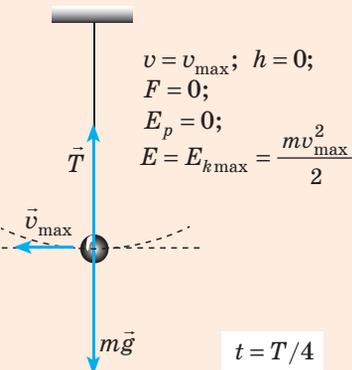
**1.** Состояние максимального отклонения от положения равновесия ( $\vec{F}$  — равнодействующая силы натяжения  $\vec{T}$  и силы тяжести  $m\vec{g}$ )



**2.** Ускоренное движение шарика, скорость увеличивается



**3.** Состояние равновесия



#### 4 Колебания математического маятника

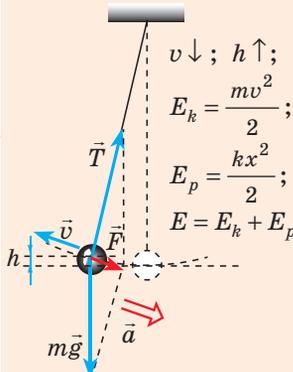
Возьмем небольшой, но достаточно тяжелый шарик и подвесим его на длинной нерастяжимой нити — такой маятник можно считать математическим. Если отклонить шарик от положения равновесия и отпустить, то в результате действия гравитационного поля Земли (силы тяжести) и силы натяжения нити шарик начнет колебаться около положения равновесия. Поскольку сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а силы, действующие в системе, являются консервативными, полная механическая энергия шарика будет сохраняться: потенциальная энергия шарика будет превращаться в его кинетическую энергию, и наоборот.

**?** Рассмотрите колебательное движение шарика (рис. 20.2). Объясните причины его движения. Какие происходят превращения энергии?

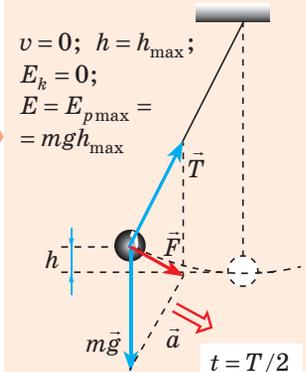
#### 5 Как вычислить период колебаний математического маятника

Математический маятник, отклоненный от положения равновесия на небольшой угол (3–5°), будет совершать гармонические колебания, то есть ускорение его движения все время будет прямо пропорционально смещению и направлено в сторону, противоположную смещению:  $a_x = -\omega^2 x$ .

**4.** Замедленное движение шарика, скорость движения уменьшается



**5.** Состояние максимального отклонения от положения равновесия



**Рис. 20.2.** Колебания математического маятника — свободные, так как происходят под действием внутренних сил системы. Причины, по которым математический маятник совершает свободные колебания, те же, что и в случае колебаний пружинного маятника: 1) равнодействующая сил, приложенных к телу, всегда направлена к положению равновесия; 2) колеблющееся тело инертно

Для математического маятника:  $\omega^2 = \frac{g}{l} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ . Поскольку  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , имеем формулу для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где  $l$  — длина маятника;  $g$  — ускорение свободного падения.

Данную формулу впервые получил в XVII в. голландский ученый Христиан Гюйгенс, поэтому ее называют **формулой Гюйгенса**.

Период колебаний математического маятника не зависит от массы маятника, а определяется только длиной нити и ускорением свободного падения в том месте, где расположен маятник. Поэтому, измерив длину нити и период колебаний маятника, можно определить ускорение свободного падения в данной местности (см. лабораторную работу № 5).

## 6 Учимся решать задачи

**Задача.** Уравнение колебаний груза массой 1 кг на пружине имеет вид:  $x = 10 \cos 2\pi t$  (см). Найдите полную механическую энергию колебаний; наибольшую скорость груза; кинетическую и потенциальную энергии системы через  $\frac{1}{6}$  с после начала отсчета времени. Трением пренебречь.

Дано:  
 $x = 0,10 \cos 2\pi t$  (м)  
 $m = 1,0$  кг  
 $t = \frac{1}{6}$  с  
 $E$  — ?  $v_{\max}$  — ?  
 $E_k$  — ?  $E_p$  — ?

*Анализ физической проблемы, решение.* Трение отсутствует, поэтому полная механическая энергия сохраняется:

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = E_k + E_p.$$

Сравним уравнение колебаний в общем виде с уравнением, приведенным в задаче:  $x = A \cos \omega t$ ,  $x = 0,1 \cos 2\pi t \Rightarrow A = 0,1$  м;  $\omega = 2\pi$  с<sup>-1</sup>.

Поскольку  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , то  $k = \omega^2 m = 4\pi^2 \cdot 1 \approx 40$  (Н/м);  $E = E_{p \max} = \frac{kA^2}{2} = 0,20$  (Дж);

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} \Rightarrow v_{\max} = \sqrt{\frac{kA^2}{m}} = A \sqrt{\frac{k}{m}} = A\omega = 0,1 \cdot 2\pi \approx 0,63 \text{ (м/с)}.$$

Определив удлинение пружины через  $t = \frac{1}{6}$  с, вычислим потенциальную и кинетическую энергии пружины:  $x = 0,1 \cos 2\pi t = 0,1 \cos 2\pi \cdot \frac{1}{6} = 0,1 \cos \frac{\pi}{3} = 0,05$  (м);

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{40 \cdot 0,0025}{2} = 0,05 \text{ (Дж)}; E = E_k + E_p \Rightarrow E_k = E - E_p = 0,20 - 0,05 = 0,15 \text{ (Дж)}.$$

Ответ:  $E = 0,20$  Дж;  $v_{\max} = 0,63$  м/с;  $E_k = 0,15$  Дж;  $E_p = 0,05$  Дж.



## Подводим итоги

• Пружинный маятник — колебательная система, представляющая собой тело, закрепленное на пружине. Период свободных колебаний пружинного маятника не зависит от амплитуды колебаний и определяется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

• Математический маятник — это физическая модель колебательной системы, состоящая из материальной точки, подвешенной на невесомой и нерастяжимой нити, и гравитационного поля. Период колебаний математического маятника не зависит от его массы и амплитуды колебаний

и определяется по формуле:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ .

• Во время свободных колебаний маятника его потенциальная и кинетическая энергии непрерывно изменяются: потенциальная энергия максимальна в точках поворота и равна нулю в момент прохождения маятником положения равновесия; кинетическая энергия в точках поворота равна нулю и достигает максимального значения в момент прохождения маятником положения равновесия.



### Контрольные вопросы

1. Опишите колебания пружинного маятника. Почему тело не останавливается, когда проходит положение равновесия? 2. По какой формуле определяют период колебаний пружинного маятника? 3. Дайте определение математического маятника. 4. Опишите колебания математического маятника. По какой формуле находят период его колебаний? 5. Какие преобразования энергии происходят во время колебаний пружинного маятника? математического маятника? 6. В каком положении потенциальная энергия маятника достигает максимального значения? минимального? Что можно сказать о кинетической энергии маятника в эти моменты?



### Упражнение № 20

- В системе «тележка — пружина» происходят свободные колебания. Как изменится период этих колебаний, если: 1) увеличить амплитуду колебаний? 2) уменьшить массу тележки? 3) увеличить жесткость пружины?
- Будет ли колебаться математический маятник в невесомости?
- Как изменится ход маятниковых часов, если их из теплой комнаты вынести в холодную кладовую? поднять с первого этажа небоскреба на крышу?
- Какова масса тела, подвешенного на пружине жесткостью 40 Н/м, если после отклонения тела от положения равновесия оно совершает 8 колебаний за 12 с?
- На какую максимальную высоту отклоняется математический маятник, если в момент прохождения положения равновесия он движется со скоростью 0,2 м/с? Какова длина маятника, если период его колебаний 2 с?
- Уравнение колебаний пружинного маятника массой 5 кг имеет вид:  $x = 0,2\cos 10\pi t$ . Определите: 1) циклическую частоту и период колебаний; 2) жесткость пружины; 3) полную механическую энергию колебаний; 4) смещение, кинетическую и потенциальную энергии маятника при  $t = 0,025$  с.
- Наблюдая за колебаниями большой люстры в Пизанском кафедральном соборе, раскачивающейся из-за сквозняка, Г. Галилей измерил период ее колебаний и установил... Выясните, что установил Г. Галилей и как он измерял период колебаний без часов. Вычислите период колебаний большой люстры в соборе (найдите информацию о длине ее подвеса).



### Экспериментальное задание

Изготовьте маятник, закрепив на длинной нити достаточно тяжелое тело, и измерьте ускорение свободного падения в вашем доме. Убедитесь, что оно действительно примерно равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

## § 21. РЕЗОНАНС



В 1750 г. возле города Анжер (Франция) по цепному мосту длиной 102 м шли в ногу солдаты. В результате размах колебаний моста увеличился настолько, что цепи оборвались и мост упал в реку. В 1830 г. по аналогичной причине разрушился подвесной мост в г. Манчестер (Великобритания). В 1940 г. из-за порывов ветра разрушился Такоумский мост в США. Эти события — классические примеры проявления резонанса в колебательных системах. Что же такое резонанс? Когда его проявления полезны, а когда нежелательны?

### 1 Почему для поддержания колебаний нужно сообщать энергию

Если колебательную систему вывести из положения равновесия, то в ней возникнут свободные колебания, частота которых не зависит от амплитуды. *Частоту свободных колебаний называют собственной частотой колебаний системы.* Из-за потерь энергии свободные колебания являются *затухающими*. Чтобы колебания не затухали, необходимо, чтобы в систему периодически поступала энергия извне.

Приведем пример. Когда человек раскачивается на качелях (а качели — это физический маятник), за счет работы мышц он периодически сообщает колебательной системе «качели» энергию.

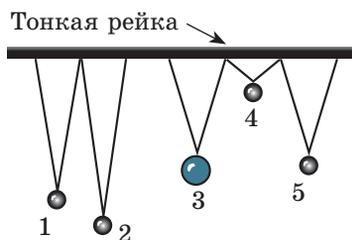
Если энергии, поступающей в систему, недостаточно для того, чтобы восполнить потери на трение, то амплитуда колебаний качелей будет уменьшаться до тех пор, *пока колебания не установятся. При установившихся колебаниях потери энергии системы равны энергии, которая поступает в систему* (в данном случае — в результате работы мышц). Если же энергии поступает больше, чем расходуется на трение, амплитуда колебаний будет увеличиваться. Однако с увеличением амплитуды будут увеличиваться и потери энергии, поэтому через некоторое время колебания вновь установятся — качели снова будут колебаться с неизменной амплитудой, только большей, чем раньше.

Можно раскачивать качели и так: стоя на земле, двигать их вперед-назад с частотой, не равной собственной частоте колебаний качелей. Качели будут колебаться, совершая *вынужденные колебания, частота которых равна частоте изменения вынуждающей силы* (силы упругости со стороны рук), однако в данном случае вряд ли хватит усилий, чтобы добиться достаточно большой амплитуды колебаний.

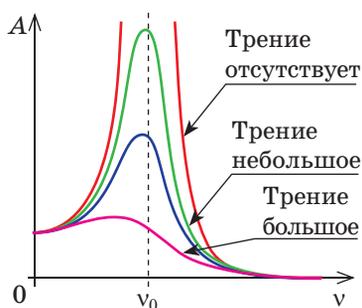
### 2 В чем причина возникновения резонанса

Раскачивать качели, двигая их вперед-назад с произвольной частотой, вы будете разве что ради физического эксперимента, ведь ваш жизненный опыт подсказывает: нужно действовать *в такт* с собственными колебаниями качелей. Амплитуда колебаний быстро увеличится, если частота внешней переменной силы будет совпадать с частотой свободных колебаний качелей.

Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний, когда частота внешней периодически изменяющейся силы совпадает с собственной частотой колебаний системы, называют **резонансом**.



**Рис. 21.1.** Изучение явления резонанса. Шарик 3 (самый тяжелый) и шарик 5 подвешены на нитях одинаковой длины



**Рис. 21.2.** Графики зависимости амплитуды  $A$  колебаний от частоты  $\nu$  внешней переменной силы при различных силах трения;  $\nu_0$  — собственная частота колебаний системы

Для наблюдения явления резонанса проведем опыт с маятниками (рис. 21.1). Выведем тяжелый шарик 3 из положения равновесия — он начнет колебаться. Колебания тяжелого маятника передадутся рейке, которая начнет совершать вынужденные колебания с той же частотой и действовать на другие маятники с некоторой периодически изменяющейся силой. В результате маятники начнут колебательное движение. При этом сильнее всего раскачается маятник 5, длина которого (а значит, и собственная частота колебаний) равна длине тяжелого маятника 3.

Выясним причины такого поведения маятников. Дело в том, что когда частота внешней переменной силы не совпадает с собственной частотой колебаний маятника ( $\nu \neq \nu_0$ ), внешняя сила то «подталкивает» маятник (совершает положительную работу), то мешает его движению (совершает отрицательную работу). В результате работа внешней силы незначительна, поэтому невелика и амплитуда установившихся колебаний.

Если частота внешней переменной силы совпадает с собственной частотой колебаний маятника ( $\nu = \nu_0$ ), то на протяжении всего времени колебаний работа внешней силы положительна. Энергия системы быстро увеличивается — быстро возрастает и амплитуда колебаний. Из-за трения колебания со временем устанавливаются, и их энергия прекращает увеличиваться.

График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты изменения внешней силы называют **резонансной кривой**.

На рис. 21.2 представлены резонансные кривые при разных силах трения. Проанализировав графики, можно сделать выводы: 1) наибольшая амплитуда колебаний достигается тогда, когда частота внешней переменной силы совпадает с собственной частотой колебаний системы ( $\nu = \nu_0$ ); 2) чем больше в системе сила трения, тем меньше пик резонансной кривой, то есть тем слабее выражен резонанс.

### 3 Как бороться с проявлениями резонанса и где применяют резонанс

Практически все физические объекты способны совершать свободные колебания. Внешние периодические воздействия на такие объекты могут вызвать резонанс и привести к разрушениям. В начале параграфа уже говорилось о случаях разрушений мостов. Также известны случаи разрушения самолетов, когда амплитуда колебаний их крыльев резко увеличивалась из-за действия турбулентных потоков воздуха. При движении поезда частота

ударов колес на стыках рельсов иногда совпадает с частотой свободных колебаний вагона на рессорах, тогда вагон начинает сильно раскачиваться и возникает опасность крушения.

Как предупредить негативные проявления резонанса? Проанализировав графики на [рис. 21.2](#), можно предложить увеличить силу трения, однако это приведет к нежелательным потерям энергии. Поэтому чаще применяют другие способы — изменяют собственную частоту колебаний системы или частоту внешней переменной силы. Так, чтобы решить упомянутую проблему с самолетами, просто сделали тяжелее их крылья: частота собственных колебаний крыльев изменилась и перестала совпадать с частотой колебаний внешней силы. Для поездов рассчитывают нежелательную скорость движения; по мостам запрещают ходить строевым шагом; при постройке домов учитывают частоту колебаний земной коры в случае землетрясений и т. д.

**?** Представьте: вы несете ведра с водой, и при некоторой скорости движения вода начинает выплескиваться. Что нужно сделать, чтобы прекратить выплескивание?

Явление резонанса может приносить и пользу. Так, благодаря резонансу легко раскачать качели или вытолкнуть застрявший автомобиль. Резонанс используют в работе виброташин в горнодобывающей промышленности, применяют в акустике, медицине, для приема и передачи радиосигналов и т. п. Изучая физику, вы еще не раз встретитесь с применением резонанса.



### Подводим итоги

- Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний, когда частота внешней периодически изменяющейся силы совпадает с собственной частотой колебаний системы, называют резонансом.
- График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты внешней переменной силы называют резонансной кривой. Чем больше в системе сила трения, тем меньше пик резонансной кривой, а значит, тем слабее выражен резонанс.



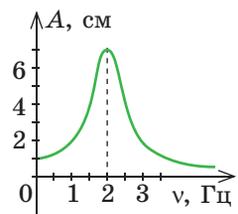
### Контрольные вопросы

1. Приведите определение резонанса и примеры его проявления.
2. Что такое резонансная кривая? Какие выводы можно сделать из ее анализа?
3. Как предупреждают негативные проявления резонанса? Где применяют резонанс?



### Упражнение № 21

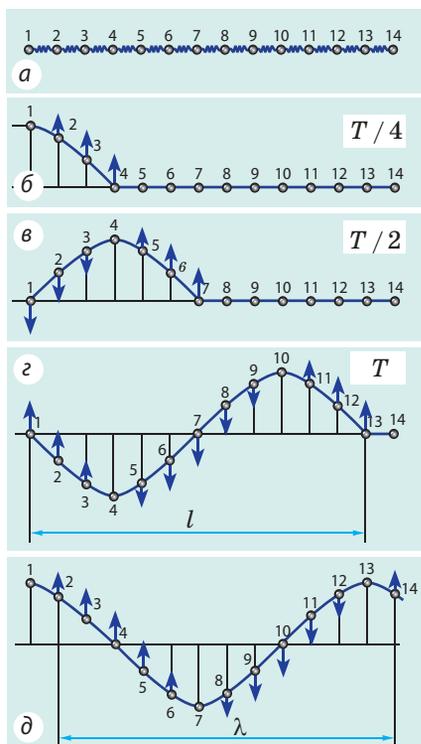
1. Когда мимо дома проходит транспорт, иногда дребезжат стекла. Почему?
2. К пружинному маятнику массой 0,5 кг приложена сила, изменяющаяся с частотой 10 Гц. Возникнет ли резонанс, если жесткость пружины 200 Н/м?
3. При какой минимальной скорости движения поезда возникнет резонанс, если длина рельса 25 м, а период собственных колебаний вагона — 1,25 с?
4. На [рисунке](#) представлена резонансная кривая пружинного маятника массой 1 кг. Определите жесткость пружины.
5. В вагоне поезда подвешен на нити длиной 40 см небольшой груз. Какова скорость движения поезда в тот момент, когда груз начинает раскачиваться особенно интенсивно? Длина железнодорожного рельса — 25 м.



## § 22. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ



Если колебания, возникнув в одном месте, распространяются в соседние участки пространства, говорят о *волновом движении* — *волнах*. В результате подземных толчков возникают сейсмические волны в земной коре — наблюдаются землетрясения и цунами; колебания диффузора динамика вызывают появление звуковых волн — мы слышим звук; колебания сердца — причина колебаний стенок артерии (пульс). Вспомним особенности волнового движения.



**Рис. 22.1.** Механизм распространения поперечной волны. Синие стрелки показывают направление и отражают модуль скорости движения (чем длиннее стрелка, тем больше скорость движения);  $\lambda$  — длина волны

не сразу, а через некоторое время. Если привести шар 1 в колебательное движение, то шар 2 тоже начнет колебаться, но с некоторым опозданием; колебания шара 2 вызовут колебания шара 3, далее шара 4 и т. д. (рис. 22.1, б–г). Наконец все шары придут в движение и будут колебаться с той же частотой, что и шар 1, однако их колебания будут отличаться фазой.

### 1 Как распространяется механическая волна

Распространение в пространстве колебаний вещества или поля называют **волной**.

По физической природе различают *электромагнитные волны* (например, радиоволны, свет) и *механические волны*.

**Механическая волна** — это распространение колебаний в упругой среде.

Среду называют *упругой*, если при ее деформации возникают силы, препятствующие этой деформации, — силы упругости.

Если один конец гимнастической ленты привести в колебательное движение, то в это движение будут постепенно вовлекаться все более отдаленные точки ленты, — по ленте побежит волна. Рассмотрим процесс распространения такой волны на модели: представим ленту в виде системы одинаковых шаров, соединенных невесомыми пружинами (шары моделируют частицы\* ленты, а пружины — упругое взаимодействие частиц) (рис. 22.1, а).

Если отклонить шар 1 от положения равновесия, то пружина растянется, на шар 2 начнет действовать сила упругости и шар 2 тоже начнет движение. Шар инертен, поэтому его движение начнется

\* Рассматривая механические волны, *частицами* будем называть не молекулы, атомы, ионы, а *небольшие фрагменты (участки) среды*.

В общем виде механизм распространения упругой волны следующий. Тело, колеблющееся в упругой среде, — *источник волны* — деформирует прилегающие к нему слои среды (в такт своим колебаниям сжимает и растягивает или сдвигает их). *Силы упругости*, возникающие в результате деформации, действуют на следующие слои среды, заставляя их тоже совершать *вынужденные колебания*. Постепенно, один за другим, все слои среды вовлекаются в колебательное движение — в среде распространяется волна.

## 2 Свойства волнового движения

1. *Волны распространяются в среде с конечной скоростью*: колебательное движение от одной точки среды к другой передается не мгновенно, а с некоторым опозданием.

2. *Источником механических волн всегда является колеблющееся тело*; поскольку колебания частиц среды при распространении волны вынужденные, то *частота колебаний каждой частицы равна частоте колебаний источника волн*.

3. *Механические волны не могут распространяться в вакууме*.

4. *Волновое движение не сопровождается переносом вещества* — частицы среды только колеблются около положений равновесия.

5. С приходом волны частицы среды начинают двигаться (приобретают кинетическую энергию). Это значит, что *при распространении волны происходит перенос энергии*. *Перенос энергии без переноса вещества — важнейшее свойство любой волны*.



Рис. 22.2. К заданию в § 22



Вспомните распространение волн на поверхности моря (рис. 22.2). Будет ли двигаться человек вместе с гребнями волн, например, к берегу? А как он будет двигаться? Почему?

## 3 Физические величины, характеризующие волну

Волна — это распространение колебаний, поэтому физические величины, характеризующие колебания (*частота  $\nu$ , период  $T$ , амплитуда  $A$  колебаний*), характеризуют и волну. Еще две важные характеристики волны — *длина  $\lambda$  волны и скорость  $v$  распространения волн*.

Скоростью распространения волны называют скорость перемещения точек с одинаковой фазой колебаний (например, скорость перемещения гребня волны). Скорость распространения волны не совпадает со скоростью движения частиц среды: частицы колеблются около положений равновесия, а волна распространяется в определенном направлении.

Вернемся к рис. 22.1. Пусть шар 1 совершил одно колебание, то есть время его движения равно одному периоду ( $t = T$ ). За это время волна распространилась до шара 13. Нетрудно заметить, что в дальнейшем шары 1 и 13 будут колебаться абсолютно одинаково — синхронно, в одинаковой фазе. Очевидно, что одинаково будут колебаться также шары 2 и 14, 3 и 15 и т. д.

**Длина волны  $\lambda$**  — это расстояние между двумя ближайшими точками, которые колеблются синхронно; расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду  $T$ :

$$\lambda = vT$$

Единица длины волны в СИ — метр:  $[\lambda] = 1 \text{ м (m)}$ .

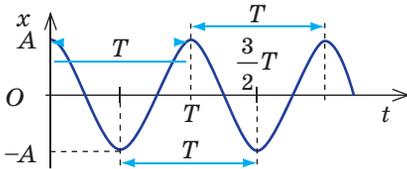
Учитывая, что  $T = 1/\nu$ , получим формулу взаимосвязи длины, частоты и скорости распространения волны — формулу волны:

$$v = \lambda\nu$$

**Обратите внимание!** Скорость распространения волны в основном определяется упругими свойствами среды, в которой волна распространяется, поэтому, если волна переходит из одной среды в другую, то скорость ее распространения изменяется, а вот частота волны остается неизменной, поскольку она определяется частотой колебаний источника волны. Таким образом, согласно формуле волны при переходе волны из одной среды в другую длина волны изменяется.

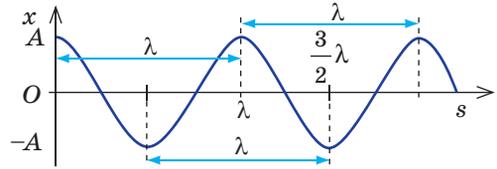
Волна периодична во времени и в пространстве. Что это значит?

Любая частица среды, где распространяется волна, осуществляет периодические колебания во времени: через определенный интервал времени  $T$  колебания частицы повторяются.



Период  $T$  — характеристика периодичности волны во времени.

Если зафиксировать определенный момент времени, то через расстояние, равное длине  $\lambda$  волны, форма волны повторится. Частицы, расположенные на расстоянии  $\lambda$  друг от друга, колеблются одинаково (синхронно).

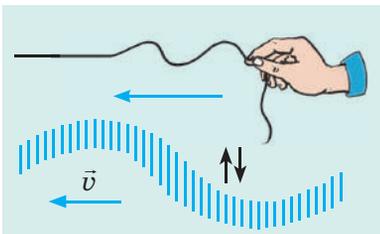


Длина  $\lambda$  волны — характеристика периодичности волны в пространстве.

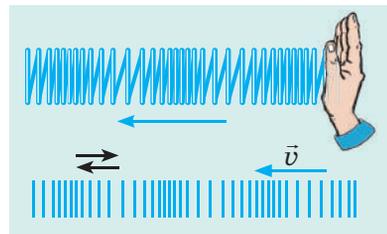
#### 4 Какие существуют виды механических волн

Из курса физики 9 класса вы знаете, что волны бывают *продольные* и *поперечные*.

**Поперечная волна** — волна, в которой частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны



**Продольная волна** — волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны



В поперечной волне происходит последовательный сдвиг одних слоев среды относительно других. Деформация сдвига вызывает появление сил упругости только в твердых телах, поэтому поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.

В продольной волне происходит поочередное сжатие или растяжение среды. Такие деформации вызывают появление сил упругости в любой среде, поэтому продольные волны могут распространяться во всех средах (жидких, твердых, газообразных).

Волны на поверхности воды не являются ни продольными, ни поперечными. Это волны смешанного типа. Частицы воды перемещаются как вдоль направления распространения волны, так и перпендикулярно ему. В общем случае частицы движутся по эллипсам.



Волны, распространяющиеся по шнуру, ленте или пружине, могут распространяться только в двух направлениях — вдоль шнура (ленты, пружины). А вот если источник волны колеблется внутри среды, волна распространяется во все стороны и вовлекает в колебание все больше точек, образующих некоторую поверхность. Поверхность, до которой дошли колебания на данный момент, называют **фронтом волны**. Все частицы фронта волны колеблются одинаково (в одной фазе). Поверхности одной фазы называют **волновыми поверхностями**. В зависимости от формы волновой поверхности различают сферические, цилиндрические, плоские волны.

**Сферическая волна** (рис. 22.3) возникает, если источником волны является пульсирующая материальная точка или сфера. В этом случае энергия, которую прилегающие слои среды получили от источника волны, распределяется по все большей площади, поэтому с увеличением расстояния от источника амплитуда волны уменьшается. То же касается и **цилиндрической волны** (такую волну создает, например, пульсирующий стержень).

Другое дело, когда **волна плоская**. Плоскую волну можно получить, если колебать пластинку перпендикулярно ее поверхности (рис. 22.4). В этом случае энергия распределяется по неизменной площади, поэтому, если силы трения пренебрежимо малы, амплитуда волны будет оставаться неизменной.



Как будет изменяться амплитуда волны на поверхности жидкости (рис. 22.5) в случае круговой волны? плоской волны?

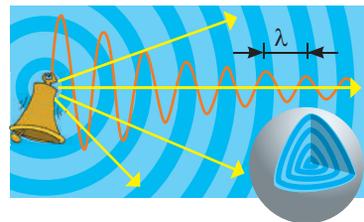


Рис. 22.3. Волновые поверхности сферической волны — сферы; с увеличением расстояния от источника амплитуда волны уменьшается

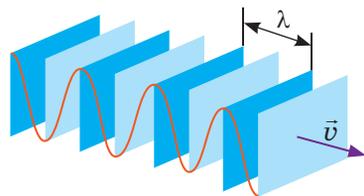


Рис. 22.4. Волновые поверхности плоской продольной волны. Синим показаны области наибольшего сжатия среды, голубым — наименьшего

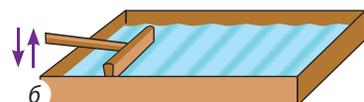
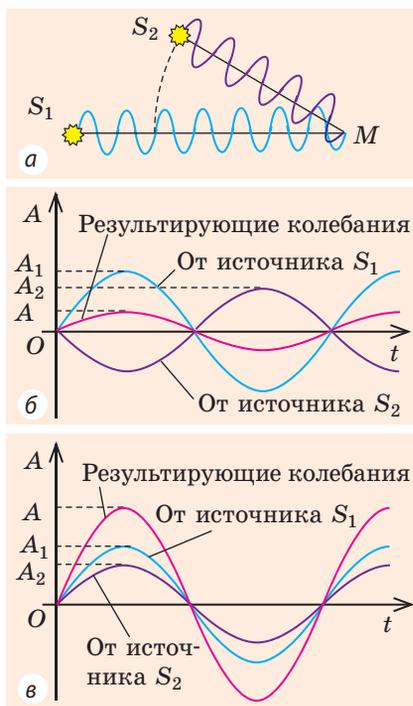
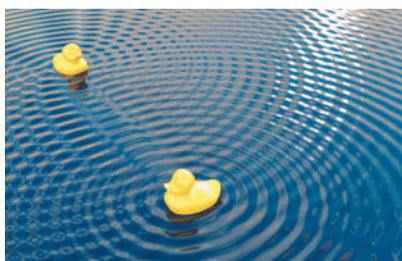


Рис. 22.5. Волны на поверхности жидкости: круговая волна (а); плоская волна (б)



**Рис. 22.6.** Волны от двух источников ( $S_1, S_2$ ) приходят в точку  $M$  и накладываются друг на друга (а). Если волны поступили в противоположных фазах, амплитуда результирующих колебаний уменьшается:  $A = A_1 - A_2$  (б), а если в одинаковых фазах, амплитуда результирующих колебаний увеличивается:  $A = A_1 + A_2$  (в)



**Рис. 22.7.** Интерференционная картина двух круговых волн от точечных источников. На поверхности воды можно увидеть участки, где колебания почти не происходят

## 5 Интерференция волн

Для волн не очень больших амплитуд справедлив принцип суперпозиции: если в точку пространства приходят волны от нескольких источников, то эти волны накладываются друг на друга. В результате такого наложения в некоторых точках пространства может наблюдаться постоянное усиление колебаний, а в некоторых — ослабление. Выясним, почему и когда это происходит. Пусть в некоторую точку  $M$  поступают две когерентные волны — волны от двух источников  $S_1$  и  $S_2$ , колеблющихся синхронно, то есть в одинаковых фазах и с одинаковой частотой (рис. 22.6, а).

Если волны приходят в точку  $M$  в противоположных фазах (в один и тот же момент времени одна волна «толкает» точку  $M$  вверх, а вторая «толкает» ее вниз), то волны будут постоянно гасить друг друга (рис. 22.6, б).

Если же волны приходят в точку  $M$  в одинаковых фазах, то в точке  $M$  будут все время наблюдаться колебания с увеличенной амплитудой (рис. 22.6, в).

Явление наложения волн, вследствие которого в некоторых точках пространства наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний, называют **интерференцией**.

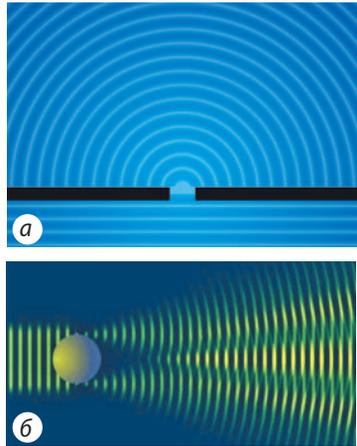
Рассмотрите рис. 22.7 и вспомните, когда вы наблюдали подобное. Увидим ли мы интерференционную картину, если утки будут колебаться с разной частотой?

## 6 Дифракция волн

Судно, плывущее по морю, образует на поверхности воды волну. Если на своем пути волна встретит скалу или торчащую из воды ветку, то за скалой образуется тень (то есть непосредственно за скалу волна не проникает), а за веткой тень не образуется (волна ветку огибает).

Явление огибания волнами препятствий называют **дифракцией** (от лат. *diffractus* — разломанный) (рис. 22.8).

В приведенном примере дифракция волны происходит на ветке, но не происходит на скале. Но это не всегда так. Если скала достаточно удалена от берега, то на некотором расстоянии от скалы тень исчезнет — волна обогнет и скалу. Дело в том, что дифракция наблюдается в двух случаях: 1) когда линейные размеры препятствий, на которые находит волна (или размеры отверстий, сквозь которые проходит волна), сопоставимы с длиной волны; 2) когда расстояние от препятствия до места наблюдения намного больше размера препятствия.



**Рис. 22.8.** Дифракция механических волн на отверстии (а); на препятствии (б)



### Подводим итоги

- Распространение в пространстве колебаний вещества или поля называют волной. Механической волной называют распространение колебаний в упругой среде.

- Волна распространяется в пространстве не мгновенно, а с конечной скоростью. При распространении волны происходит перенос энергии без переноса вещества. В некоторых точках пространства вследствие наложения волн друг на друга может наблюдаться устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний — это явление называют интерференцией. Волны могут огибать препятствия — это явление называют дифракцией.

- Волну, в которой частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, называют поперечной. Волну, в которой частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны, называют продольной.

- Волна периодична во времени и пространстве. Периодичность волны во времени характеризуется периодом колебаний каждой отдельной точки волны. Периодичность волны в пространстве характеризуется длиной волны. Длина волны — это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний. Длина  $\lambda$ , частота  $\nu$  и скорость  $v$  распространения волны связаны формулой волны:  $v = \lambda\nu$ .



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение механической волны, опишите механизм ее образования.
2. Назовите основные особенности волнового движения.
3. Какие физические величины характеризуют волну?
4. Что такое длина волны? От чего она зависит?
5. Как связаны длина, частота и скорость распространения волны?
6. Что означает выражение «волна периодична во времени и пространстве»?
7. Какие волны называют продольными? поперечными? В каких средах они распространяются?
8. Какие волны называют сферическими? плоскими? Как с удалением от источника изменяется энергия волны?
9. В чем заключается явление интерференции? В каких случаях волны усиливают друг друга? ослабляют друг друга?
10. Приведите примеры дифракции механических волн.



### Упражнение № 22

1. Тело на поверхности воды совершает 90 колебаний за 36 с. От тела со скоростью 1,5 м/с распространяется механическая волна. Установите соответствие между физической величиной и ее числовым значением в единицах СИ.

1 Длина волны	А 0,4
2 Частота волны	Б 0,6
3 Период колебаний источника волны	В 2,4
	Г 2,5

2. На рис. 1 показано распространение волны в пружине. Определите длину волны. Какая это волна — продольная или поперечная?

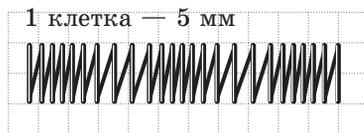


Рис. 1

3. По шнуру распространяется поперечная волна. В представленный на рис. 2 момент времени точка В движется вверх. Определите: 1) амплитуду, длину, частоту волны; 2) направление распространения волны; 3) направление, в котором в данный момент времени движутся точки А и С волны; 4) направление ускорения движения точек А и С.

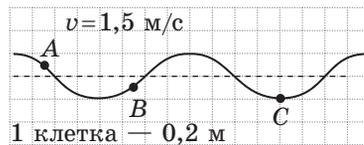


Рис. 2

4. Выясните, как образуются и распространяются сейсмические волны. Какими могут быть частота, длина, скорость распространения таких волн? Как предсказать землетрясение? Составьте задачу, используя полученные данные.



5. Звуковые волны — это механические волны. Вспомните курс физики 9 класса и приведите несколько примеров источников звуковых волн.



### Экспериментальное задание

Изготовьте устройства (см., например, рис. 22.5, б), с помощью которых можно создать круговые и плоские волны на поверхности воды в ванне. Сделайте видеозапись волн и определите их характеристики. Понаблюдайте интерференцию волн от двух источников, дифракцию волн на отверстиях и на препятствии.

### Физика и техника в Украине



**Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины** (Киев) создан в 1966 г.; его основателем и первым директором был академик АН УССР *Георгий Степанович Писаренко* (1910–2001).

Основные направления научной деятельности института — механика разрушений и живучесть конструкций, колебания неконсервативных механических систем — принесли учреждению мировое признание (напомним одну из задач

строительной механики: какой толщины должны быть стены разных зданий, чтобы выдержать нагрузку не только в нормальных условиях, но и при землетрясениях). Ученые института сделали весомый вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований по установлению критериев прочности и методов повышения несущей способности материалов и элементов технических конструкций.

## § 23. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ



Звучание флейты, шум мегаполиса, шорох травы, грохот водопада, человеческая речь, музыкальный звук, шум, акустический резонанс... Все это связано с распространением в пространстве определенных механических волн, которые называют *звуковыми волнами*. Их изучает *акустика* — наука о звуке. С элементами акустики вы начали знакомиться в курсе физики 9 класса. Итак, вспоминаем и узнаем новое.



### 1 Вспоминаем звуковые волны

**Звуковые (акустические) волны** — это механические волны с частотами от 20 Гц до 20 кГц.

Звуковые волны обычно доходят до уха через воздух — в виде последовательных сгущений и разрежений (то есть в воздухе звуковые волны являются продольными). В зонах сгущений (разрежений) давление воздуха незначительно больше (меньше) атмосферного (рис. 23.1).

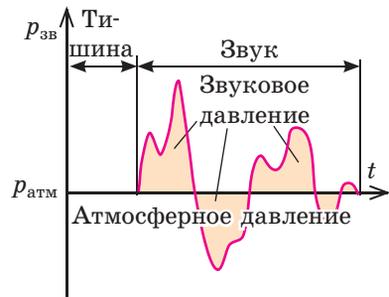
Звук — механическая волна, потому все свойства волнового движения касаются и звука.

- *Звук распространяется в среде с конечной скоростью, зависящей от температуры, плотности, состава и других характеристик среды.* Так, в жидкостях звук распространяется быстрее, чем в газах, и медленнее, чем в твердых телах. Скорость распространения звука обычно увеличивается с увеличением температуры среды (в воздухе при температуре 0 °С скорость распространения звука составляет около 330 м/с, а при 20 °С — 340 м/с). Кроме того, чем меньше масса молекул среды, тем быстрее распространяется звук.

- *Источником звука является колеблющееся тело (рис. 23.2).* Такие колебания могут быть *вынужденными* (диффузор громкоговорителя), *свободными* (струна гитары), *автоколебаниями* (струны смычковых инструментов).

- *Звук не распространяется в вакууме.*
- *При распространении звука не происходит переноса вещества, но происходит перенос энергии.*

- *Звуковые волны могут накладываться друг на друга (явление интерференции); могут огибать препятствия (явление дифракции).*



**Рис. 23.1.** Человеческое ухо воспринимает звуковые волны с избыточным (звуковым) давлением примерно от 20 мкПа (0 децибелов — порог слышимости) до 20 Па (120 децибелов — болевой порог). Для сравнения  $p_{\text{атм}} = 100\,000$  Па



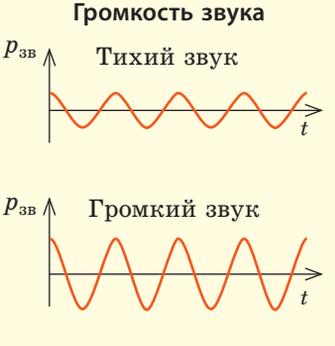
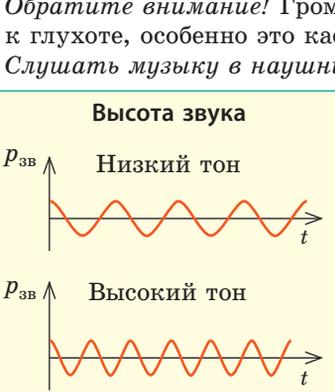
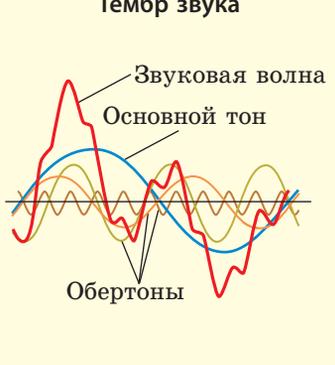
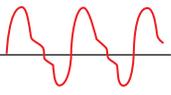
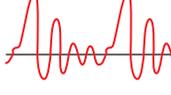
**Рис. 23.2.** Если к ножке звучащего камертона поднести легкий шарик, то шарик отскочит, так как ножки камертона колеблются



Какие опыты и наблюдения могут подтвердить указанные в п. 1 § 23 свойства звука?

## 2 Как связаны субъективные и объективные характеристики звука

Все физические величины, характеризующие механические волны (*амплитуда, частота, длина, энергия*), являются и характеристиками звука. Эти величины не зависят от особенностей восприятия звука человеком, поэтому их называют *объективными, или физическими*, характеристиками звука. *Субъективные* характеристики звука (*громкость, высота, тембр*) обусловлены особенностями слуха человека, поэтому их называют *физиологическими*. Понятно, что физические и физиологические характеристики звука связаны (см. [таблицу](#)).

Субъективные (физиологические) характеристики звука	
<p><b>Громкость звука</b></p> 	<p><b>Громкость звука</b> определяется прежде всего <i>амплитудой звуковой волны</i> (звуковым давлением), однако зависит и от <i>частоты</i> звуковой волны. Человеческое ухо плохо воспринимает звуки низких (около 20 Гц) и высоких (около 20 кГц) частот, лучше всего — средних частот (1–3 кГц).</p> <p>Громкость звука измеряют в <i>децибелах</i> (дБ). Так, при частоте звука 1 кГц и звуковом давлении 20 Па громкость звука составляет 120 дБ — это <i>болевой порог звука</i> — наиболее громкий звук, который может воспринимать человек, не чувствуя боли (звук такой громкости издает двигатель реактивного самолета).</p>
<p><b>Высота звука</b></p> 	<p><b>Высота звука</b> определяется в основном <i>частотой звуковой волны</i>: чем больше ее частота, тем выше тон звука. Например, ноте «ля» первой октавы соответствует частота 440 Гц; ноте «ля» второй октавы — частота 880 Гц.</p> <p>Свойство человеческого уха различать звуки по их частоте также зависит от <i>интенсивности звуков</i>. При увеличении интенсивности звука его высота кажется более низкой.</p>
<p><b>Тембр звука</b></p> 	<p><b>Тембр звука</b> определяется <i>составом звуковой волны</i>: кроме основной частоты (по которой мы и оцениваем высоту звука) любой звук содержит несколько более слабых и более высоких дополнительных частот — <i>обертонов</i>. Именно благодаря тембру мы узнаем человека по голосу, отличаем звуки фортепиано от звуков флейты и т. д. Каждый музыкальный инструмент, каждый человек или животное имеют свой тембр.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> <div data-bbox="534 1606 705 1740"> <p>Фортепиано</p>  </div> <div data-bbox="748 1606 919 1740"> <p>Флейта</p>  </div> <div data-bbox="937 1606 1108 1740"> <p>Голос человека</p>  </div> </div>

### 3 Что такое акустический резонанс

На любое тело, расположенное в пределах распространения звуковой волны, действует периодическая сила, частота которой равна частоте волны. Под действием этой силы тело начинает совершать вынужденные колебания. Если частота собственных колебаний тела совпадает с частотой звуковой волны, то амплитуда колебаний тела увеличивается и оно начинает издавать звук — наблюдается *акустический резонанс*.

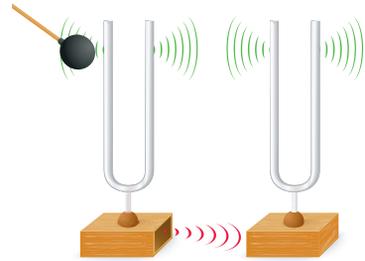
**Акустический резонанс** — это явление резкого возрастания амплитуды звукового сигнала при приближении частоты сигнала-возбудителя к частоте собственных колебаний системы.

Наблюдать акустический резонанс можно с помощью опыта с двумя камертонами, имеющими одинаковую частоту (рис. 23.3).

Акустический резонанс используют для увеличения интенсивности звука, созданного некоторым источником (струной, ножками камертона, голосовыми связками и т. д.). Например, для увеличения громкости камертона его присоединяют к деревянному ящичку (резонатору), собственная частота колебаний воздуха в котором равна частоте колебаний камертона. Камертон, присоединенный к резонатору, звучит гораздо громче, чем тот, который держат в руке.

**?** А в каком случае камертон будет звучать дольше — с резонатором или без него?

Акустический резонанс используют во многих музыкальных инструментах. Воздух в трубах органа, корпусах арф, бандур, гитар и т. д. резонирует с тонами и обертонами звуков, издаваемых колеблющимися телами, и усиливает их. Полость рта — резонатор для звуковых волн, которые создаются благодаря колебаниям голосовых связок.



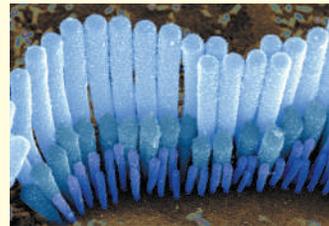
**Рис. 23.3.** Если заставить звучать один из камертонов, из-за резонанса начнет звучать и второй

#### Как мы слышим

Звуковая волна, достигнув уха, испытывает ряд преобразований. Сначала она действует на *барабанную перепонку*, заставляя ее вибрировать. Чем громче звук, тем сильнее вибрирует перепонка, передавая звуковые колебания в *среднее ухо*, где они усиливаются.

Усиленный звук попадает во *внутреннее ухо* с заполненной жидкостью *улиткой*. Поверхность улитки покрыта *волосковыми клетками*, количество которых достигает 15 000. Каждая клетка резонирует с определенным диапазоном частот. Обнаружив «собственную» частоту, клетка начинает колебаться, возбуждая нервные окончания, и в мозг идет нервный импульс — человек слышит звук.

С возрастом количество волосковых клеток уменьшается (от 15 000 у ребенка до 4 тысяч у пожилого человека). Первыми погибают клетки, «отвечающие» за высокую частоту, поэтому взрослый человек не слышит высоких звуков (подросток слышит звуки до 22 кГц, пожилой человек — до 12 кГц).





**Рис. 23.4.** Медузы чувствуют инфразвук от приближающегося шторма за 15 часов до его начала, поэтому заранее отплывают от берега

## 4

## Вспоминаем инфра- и ультразвук

**Инфразвук** (от лат. *infra* — ниже, под) — это механические волны, частота которых меньше 20 Гц.

Инфразвуковые волны возникают во время штормов, землетрясений, цунами, извержений вулканов, вследствие ударов о берег морских волн. Некоторые существа способны воспринимать инфразвуковые волны (рис. 23.4). Источником инфразвука могут быть и объекты, созданные человеком: турбины, двигатели внутреннего сгорания и т. д. В городах наибольший уровень инфразвука около автомагистралей.

Инфразвук очень опасен для животных и человека: он может вызывать симптомы морской болезни, головокружение, потерю зрения, стать причиной повышенной агрессивности. При длительном воздействии интенсивное инфразвуковое излучение может привести к остановке сердца. При этом человек даже не понимает, что происходит, ведь он не слышит инфразвука.

Механические волны, частота которых превышает 20 кГц, называют **ультразвуковыми волнами** (от лат. *ultra* — сверх, за пределами).

Ультразвук есть в шуме ветра и водопада, в звуках, которые издают некоторые живые существа. Установлено, что ультразвук до 100 кГц воспринимают многие насекомые и грызуны; улавливают его и собаки.

Слабый ультразвук — основа **ультразвуковой локации** — *определения расположения и характера движения объекта с помощью ультразвука*. Так, летучие мыши и дельфины, излучая ультразвук и воспринимая его эхо, могут даже в полной темноте найти дорогу или поймать добычу. Ультразвуковое исследование позволяет «увидеть» еще не родившегося младенца, исследовать состояние внутренних органов, выявить инородные тела в тканях. Ультразвуковую локацию применяют также на морских судах — для выявления объектов в воде (*сонары*) и исследования рельефа морского дна (*эхолоты*); в металлургии — для выявления и установления размеров дефектов в изделиях (*дефектоскопы*).

Мощный ультразвук применяют в *технике* (обработка прочных материалов, сварка, очистка поверхностей от загрязнений); *медицине* (измельчение камней в организме, что позволяет избежать хирургических операций); *пищевой промышленности* (изготовление сыров, соусов); *косметологии* (изготовление кремов, зубной пасты).



### Подводим итоги

- Механические волны с частотами 20 Гц — 20 кГц называют звуковыми волнами (звуком). Субъективные характеристики звука: высота звука (определяется частотой звуковой волны); громкость звука (определяется амплитудой и частотой звуковой волны); тембр звука (определяется спектром звуковой волны).

• Явление резкого возрастания амплитуды звукового сигнала в случае приближения частоты сигнала-возбудителя к частоте собственных колебаний системы называют акустическим резонансом. Акустические резонаторы имеют почти все музыкальные инструменты.

• Механические волны, частота которых меньше 20 Гц, называют инфразвуковыми волнами (инфразвук). Механические волны, частота которых превышает 20 кГц, называют ультразвуковыми волнами (ультразвук).



### Контрольные вопросы

1. Что такое звук? 2. Приведите примеры источников и приемников звука. 3. От чего зависит скорость распространения звука? 4. Какой физической величиной определяется высота звука? громкость звука? 5. Где используют акустический резонанс? 6. Что такое инфразвук? Как он влияет на человека? 7. Что такое ультразвук? Приведите примеры применения ультразвука в природе, медицине, технике.



### Упражнение № 23

Считайте, что скорость распространения звука в воздухе — 340 м/с, в воде — 1500 м/с, в чугуне — 5000 м/с.

1. Частота основного музыкального тона «ля» — 440 Гц. Определите длину волны этого тона в воздухе; воде; чугуне.
2. Какова глубина моря, если ультразвуковой сигнал, отразившись от морского дна, вернулся через 0,8 с после передачи?
3. Во сколько раз и как изменится длина звуковой волны при ее переходе из воды в воздух?
4. Почему в лесу мы слышим друг друга несмотря на то, что на «пути» звуковой волны есть деревья, а древесина хорошо поглощает звук?
5. Почему резонатор камертона представляет собой обычный ящик, а корпуса виолончели, скрипки, рояля имеют сложную форму? Проверьте свой ответ, воспользовавшись дополнительными источниками информации.
6. Как известно, ночью звук вдоль поверхности Земли распространяется на большие расстояния, чем днем. Выясните, как можно объяснить данное явление.



### Экспериментальное задание

«Цветомузыка дома». Для проведения эксперимента вам понадобятся: прочный пластиковый или бумажный стаканчик, пищевая пленка, изоляционная лента или скотч, небольшая зеркальная поверхность (осколок зеркала или CD-диска размерами примерно  $1 \times 1$  см), лак, лазерная указка, ножницы.

**Подготовка к эксперименту.** Обрежьте дно стаканчика, накройте широкую часть полученного усеченного конуса пищевой пленкой и зафиксируйте пленку изоляционной лентой. В центре пленки закрепите лаком «зеркальце». **Эксперимент.** Положите стаканчик открытой частью вплотную к динамику магнитофона, компьютера и т. п. Включите музыку и направьте луч от лазерной указки на зеркало. «Солнечный зайчик» от лазерного луча будет «танцевать» под музыку. Объясните наблюдаемое явление.



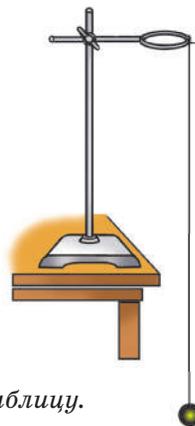
## i

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

**Тема.** Исследование колебаний нитяного маятника, измерение ускорения свободного падения.

**Цель:** изготовить нитяной маятник, определить с его помощью ускорение свободного падения; убедиться в справедливости формулы Гюйгенса.

**Оборудование:** штатив с муфтой и лапкой, металлический шарик (или груз) с петелькой, нить длиной 1,5–2 м, измерительная лента, секундомер.



## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

### II Подготовка к эксперименту

Изготовьте маятник (см. рисунок). Нить маятника должна быть достаточно длинной — шарик должен почти касаться пола.

### III Эксперимент

*Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.*

1. Измерьте длину маятника (расстояние от точки подвеса до центра шарика).
2. Отклоните маятник от положения равновесия на 5–8 см и отпустите.
3. Измерьте время, за которое маятник совершает 20 колебаний.
4. Повторите опыт еще три раза, в последний раз (опыт 4) уменьшив длину маятника в два раза.

Номер опыта	Длина нити $l$ , м	Количество колебаний $N$	Время колебаний		Период колебаний $T$ , с
			$t$ , с	$t_{\text{ср}}$ , с	

### IV Обработка результатов эксперимента

*Часть 1. Измерение ускорения свободного падения*

1. По данным опытов 1–3 определите: 1) среднее время 20 колебаний:  $t_{\text{ср}} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3$ ; 2) период колебаний маятника:  $T = t_{\text{ср}} / N$ ; 3) ускорение свободного падения:  $g_{\text{изм}} = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ .
2. Оцените относительную погрешность эксперимента, сравнив значение ускорения свободного падения, полученное в ходе эксперимента ( $g_{\text{изм}}$ ), с табличным ( $g_{\text{табл}}$ ):  $\varepsilon_g = \left| 1 - \frac{g_{\text{изм}}}{g_{\text{табл}}} \right| \cdot 100\%$ .

*Часть 2. Проверка формулы Гюйгенса*

1. Для опыта 4 вычислите период колебаний маятника двумя способами: 1) воспользовавшись определением периода:  $T = \frac{t}{N}$ ; 2) воспользовавшись формулой Гюйгенса:  $T' = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ; считайте, что  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .
2. Оцените относительную погрешность эксперимента:  $\varepsilon_T = \left| 1 - \frac{T}{T'} \right| \cdot 100\%$ .

### V Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. В выводе укажите: 1) величины, которые вы измеряли; 2) зависят ли значения этих величин от длины нити (если зависят, то как); 3) причины погрешности.

# ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА I «МЕХАНИКА».

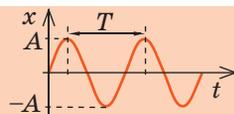
## Часть 3. Механические колебания и волны

1. Вы углубили свои знания о *механических колебаниях*.



2. Вы узнали об идеальном колебательном движении — *гармонических колебаниях*.

**Гармонические колебания** — колебания, при которых координата материальной точки изменяется по закону синуса или косинуса:  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  или  $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ .



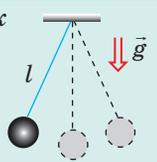
Амплитуда $A$ , м	Период $T$ , с	Частота $\nu$ , Гц	Циклическая частота $\omega$ , $\text{с}^{-1}$
$A = x_{\text{max}}$ — максимальное смещение	$T = \frac{t}{N}$ — время одного колебания	$\nu = \frac{N}{t}$ — число колебаний за 1 с	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ — число колебаний за 2π секунд

3. Вы ознакомились со *свободными колебаниями маятников*.

*Математический маятник*

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + mgh$$



*Пружинный маятник*

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



4. Вы узнали о явлении *резонанса*, возникающем в колебательных системах.

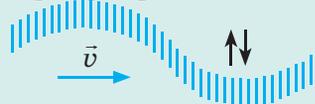
**Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота внешней периодической силы совпадает с собственной частотой колебаний системы.

5. Вы вспомнили *механические волны* — процесс распространения механических колебаний в упругой среде; виды механических волн, формулу волны.

**Продольные волны:** частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны.



**Поперечные волны:** частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.



**Формула волны**

$$v = \lambda\nu$$

6. Вы вспомнили *звуковые волны* и их характеристики.

**Инfrasound**  
(1 мГц — 20 Гц)

**ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ**

**Ультразвук**  
(свыше 20 кГц)

**Слышимый звук** (20 Гц — 20 кГц). *Высота (тон) звука* определяется частотой звуковой волны; *громкость звука* — амплитудой колебаний (значением звукового давления); *тембр звука* — спектром звуковой волны (количеством и частотой обертонов).

# ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ I «МЕХАНИКА».

## Часть 3. Механические колебания и волны

Задания 1, 2, 5 содержат только один правильный ответ.

- (1 балл) Какие существа могут воспринимать инфразвук?  
а) дельфины; б) летучие мыши; в) медузы; г) пингвины.
- (1 балл) Явление огибания волной препятствий называется:  
а) интерференция; б) дифракция; в) резонанс; г) эхолокация.
- (2 балла) Установите соответствие между определениями и названиями физических величин, характеризующих волну.  

1 Максимальное отклонение от положения равновесия	А Длина волны
2 Количество колебаний в единицу времени	Б Частота колебаний
3 Расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися одинаково	В Период колебаний
4 Время одного колебания	Г Энергия колебаний
	Д Амплитуда колебаний
- (2 балла) Установите соответствие между видом колебаний и телом, совершающим такие колебания.  

1 Свободные колебания	А Биение сердца
2 Вынужденные колебания	Б Колебания поплавок на поверхности воды
3 Автоколебания	В Периодическая смена дня и ночи
	Г Колебания струны гитары
- (2 балла) Ножка камертона излучает ноту «ля» первой октавы. Определите длину звуковой волны, если скорость распространения звука равна 330 м/с.  
а) 75 см; б) 37,5 см; в) 29 см; г) 14,5 см.
- (3 балла) На рис. 1 показана поперечная волна, бегущая по упругому шнуру. Как в данный момент направлены скорость и ускорение движения точек А и В шнура?
- (3 балла) По графику колебаний тела (рис. 2) запишите уравнение колебаний.
- (3 балла) Тело, подвешенное на пружине, отклонили на 5 см вниз от положения равновесия и отпустили. Какой путь пройдет тело за 10 с и каким будет его перемещение за это время, если частота колебаний — 0,625 Гц?
- (3 балла) Найдите период колебаний маятника (рис. 3). Длина нити  $l=1,6$  м.

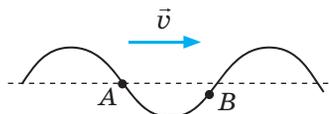


Рис. 1

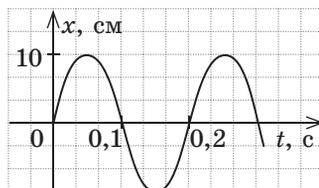


Рис. 2

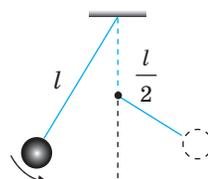


Рис. 3

- (4 балла) Уравнение колебаний груза на пружине имеет вид:  $x=0,05 \cos 2\pi t$  (м). Определите жесткость пружины; максимальную скорость колебаний груза; потенциальную энергию пружины в фазе  $\pi/4$ . Масса груза — 200 г.

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, определите сумму баллов и разделите ее на два. Полученный результат будет соответствовать уровню ваших знаний.



Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой вы найдете на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».

### Мечты фантастов воплощаются в жизнь

В 2017 г. весь мир обсуждал видео, на котором робот впервые в истории выполнил сальто. Но как это яркое зрелище связано с понятиями механики?

Во-первых, это красиво! Это технически и эстетически красивое решение. За миллионы лет природа воплотила в живых организмах множество эффективных «технических решений», которые сейчас воспроизводят инженеры. Так, принцип работы экскаватора напоминает движение руки человека, планеры парят в небе подобно птицам. Возник даже новый раздел техники — *бионика*, использующая идеи природы для создания новых технических решений. Понятно, что человекоподобные роботы — это, пожалуй, самый «продвинутой» пример.

А вот «во-вторых» касается механики напрямую. Человек — это довольно слабое существо. Даже тренированные люди обычно не могут бежать быстрее 40 км/ч и поднимать более 250 кг. Издавна для увеличения своих возможностей человек использовал или животных (лошади, слоны, быки и т. п.), или простые устройства (рычаг, колесо и др.). Причем тысячи лет преимущественно использовались животные. Люди путешествовали пешком, а чтобы ускорить процесс — садились на лошадь или в карету. Пахали тоже с помощью животных.

Ситуация начала изменяться примерно 150 лет назад. Развитие механики позволило заменить лошадей поездами и автомобилями. Обратите внимание на следующие даты. Автомобиль впервые начал двигаться быстрее гепарда (самое быстрое животное на Земле, развивает



скорость 110–115 км/ч) только на рубеже XIX и XX вв. — чуть больше 100 лет назад! Примерно в то же время (декабрь 1903 г.) подобно птице поднялся в небо самолет — механический аппарат тяжелее воздуха. А самую быструю птицу (сапсан может развить скорость свыше 322 км/ч) самолет «обогнал», достигнув скорости 350–400 км/ч, только в середине 1920-х гг. (А ведь это совсем недавно — тогда, возможно, ваши прабабушки и прадедушки ходили в школу!) Конечно, сейчас ситуация в корне изменилась: никого не удивляет путешествие авиалайнером со скоростью свыше 800 км/ч, а для автомобилей из соображений безопасности даже введены ограничения скорости.

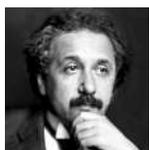
Несмотря на безусловный прогресс механических устройств, они, как правило, не могут работать без человека. Поэтому на самом деле в современных механизмах работают, так сказать, две составляющие механики: созданное инженерами собственно устройство и опыт человека, который управляет этим устройством и навыки которого тоже базируются на законах механики.

Вернемся к сальто робота. Это один из первых примеров сочетания действительно красивого технического решения (на снимках робот очень похож на человека в скафандре) и креативного «мозга»: на основе уравнений механики инженеры «научили» механизм правильным движениям.

Ждем будущих достижений...

## РАЗДЕЛ II. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### § 24. ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ



А. Эйнштейн

«С тех пор как за теорию относительности взялись математики, — признавался А. Эйнштейн, — я ее уже и сам не понимаю». И неудивительно, что вокруг теории относительности вот уже более 100 лет не утихают ожесточенные споры ее «не понимающих». Что послужило причиной создания этого, на первый взгляд, чисто теоретического раздела физики? Оказывается, сначала, почти как всегда в физике, был эксперимент.

#### 1 Принцип относительности Галилея — Ньютона

Механика — наука о движении. В механике Ньютона любое движение рассматривают относительно инерциальных *систем отсчета* (СО). Решая задачу, выбирают некую *инерциальную СО*, условно считая ее неподвижной. Однако это не означает, что выбранная СО — единственно правильная. Можно выбрать любую инерциальную СО — результат будет одинаков.

Для инерциальных СО справедлив **механический принцип относительности** (**принцип относительности Галилея — Ньютона**):

Любые механические процессы во всех инерциальных СО происходят одинаково при одинаковых начальных условиях, то есть никакими механическими опытами внутри системы нельзя установить, движется система равномерно прямолинейно или покоится.

В инерциальных СО выполняется **классический закон сложения скоростей**: *скорость  $\vec{v}$  движения тела относительно неподвижной СО равна сумме скорости  $\vec{v}_1$  движения тела относительно подвижной СО и скорости  $\vec{v}_2$  движения подвижной СО относительно неподвижной:  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .*

#### 2 Предпосылки создания специальной теории относительности

После того как в середине XIX в. английский физик *Джеймс Максвелл* (1831–1879) сформулировал основные законы электродинамики, возник вопрос: распространяется ли принцип относительности Галилея — Ньютона на электромагнитные явления? Другими словами: протекают ли электромагнитные процессы (взаимодействие электрических зарядов, распространение электромагнитных волн и т. д.) одинаково во всех инерциальных СО?

Размышления над этим вопросом, казалось бы, сразу приводят к отрицательному ответу. Например, согласно законам электродинамики *скорость распространения электромагнитных волн в вакууме*, в том числе скорость распространения света, одинакова во всех направлениях и равна 299 792 458 м/с (для расчетов обычно берут округленное значение:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Однако согласно классическому закону сложения скоростей скорость света должна зависеть от выбора СО. Так ли это? Для ответа на этот

вопрос американские ученые *Альберт Майкельсон* (1852–1931) и *Эдвард Морли* (1838–1923) в 1887 г. поставили эксперимент.

Идея ученых заключалась в следующем. Если от источника света на Земле направить луч света сначала вдоль линии движения Земли, а затем перпендикулярно ей, то в каждом случае скорость распространения света относительно неподвижной СО должна быть равной. Действительно, согласно классическому закону сложения скоростей скорость  $c_1$  света, распространяющегося в направлении движения Земли, должна быть равна:

$$c_1 = c + v,$$

где  $v = 2,96 \cdot 10^4$  м/с — скорость движения Земли вокруг Солнца.

Если свет распространяется в направлении, противоположном направлению движения Земли, то скорость  $c_2$  его распространения должна быть равна:  $c_2 = c - v$ . Соответственно скорость  $c_3$  света, распространяющегося перпендикулярно направлению движения Земли, должна составлять:  $c_3 = \sqrt{c^2 + v^2}$ .

Опыты А. Майкельсона и Э. Морли показали, что *скорость распространения света в любом случае одинакова* (рис. 24.1). Это поставило в «тупик» ведущих физиков конца XIX — начала XX в., ведь *полученный результат противоречил классическому закону сложения скоростей*.

Так какая же теория истинна — классическая механика Ньютона или электромагнитная теория Дж. Максвелла? Решением проблемы заинтересовались ведущие физики того времени, среди которых были *Хендрик Антон Лоренц* (1853–1928), *Жюль Анри Пуанкаре* (1854–1912), *Герман Минковский* (1864–1909), *Альберт Эйнштейн* (1879–1955). Было понятно, что проблему можно решить только на основе новых физических представлений о пространстве и времени. Такие представления начали развиваться еще в конце XIX в., а окончательно были сформулированы А. Эйнштейном в работе «К электродинамике движущихся тел». Независимо друг от друга А. Эйнштейн и Ж. А. Пуанкаре сформулировали важные постулаты, которые легли в основу *специальной теории относительности*, или *релятивистской механики* (от лат. *relativus* — относительный).

**Специальная теория относительности (СТО)** рассматривает взаимосвязь физических процессов *только в инерциальных СО*, то есть в СО, которые движутся друг относительно друга равномерно прямолинейно.

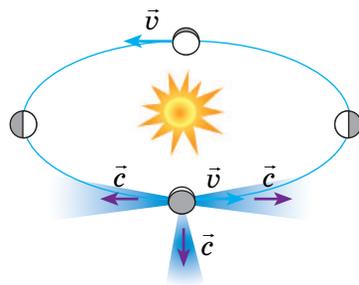
### 3

## Постулаты специальной теории относительности

### Первый постулат СТО:

В инерциальных СО все законы природы одинаковы.

Это означает, что *все инерциальные СО эквивалентны (равноправны)*. При наличии двух инерциальных СО нет смысла выяснять, какая из них



**Рис. 24.1.** Независимость скорости распространения света от выбора СО. Скорость распространения света вдоль линии движения Земли и перпендикулярно линии ее движения неизменна и равна скорости распространения света в вакууме:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с

движется относительно наблюдателя, а какая неподвижна. *Никакие опыты* в любой области физики (электричество и магнетизм, молекулярная физика, ядерная физика, механика и т. д.) *не позволяют выделить абсолютную (предпочтительную) инерциальную СО.*

### Второй постулат СТО:

Скорость распространения света в вакууме одинакова во всех инерциальных СО.

Это означает, что скорость распространения света в вакууме *инвариантна* — она не зависит от скорости движения источника или приемника света. Неизменность скорости распространения света — фундаментальное свойство природы. Согласно данному постулату *скорость распространения света — максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия.* Материальные объекты не могут иметь скорость большую, чем скорость света.

## 4 Абсолютно ли время

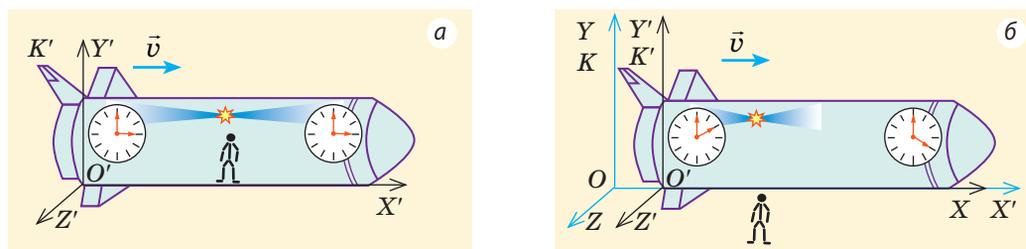
Кроме скорости света еще одним важнейшим понятием СТО является понятие *события*.

**Событие** — любое явление, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени.

Событие для материальной точки считается заданным, если заданы координаты  $(x, y, z)$  места, где событие происходит, и время  $t$ , когда это событие происходит. С геометрической точки зрения, задать событие означает задать точку в четырехмерном пространстве «координаты — время».

В классической механике Ньютона время одинаково в любой инерциальной СО, то есть такие понятия, как «сейчас», «раньше», «позже», «одновременно», не зависят от выбора СО. В релятивистской механике время зависит от выбора СО. События, произошедшие в одной СО одновременно, в другой СО могут быть разделены временным промежутком, то есть **одновременность двух событий относительна**. Покажем это с помощью мысленного эксперимента.

Пусть в центре космического корабля (рис. 24.2), движущегося со скоростью  $v$  относительно внешнего наблюдателя, произошла вспышка света. Для наблюдателя, находящегося внутри корабля, свет достигает носа и кормы корабля одновременно, то есть в системе отсчета  $K'$ , связанной с кораблем, эти два события происходят одновременно (см. рис. 24.2, а). Для внешнего наблюдателя свет достигает кормы раньше, чем носа корабля,



**Рис. 24.2.** Относительность одновременности событий: а — для наблюдателя внутри корабля свет достигает носа и кормы корабля одновременно; б — для наблюдателя вне корабля свет достигает носа корабля позже, чем кормы

поскольку корма приближается к наблюдателю, а нос корабля удаляется от него, то есть в системе отсчета  $K$ , связанной с внешним наблюдателем, *эти два события происходят не одновременно* (см. рис. 24.2, б).

### 5 Релятивистский закон сложения скоростей

Согласно второму постулату СТО скорость света в вакууме постоянна — она не зависит от скорости движения источника или приемника света. Это означает, что классический закон сложения скоростей в релятивистской механике применять нельзя. В СТО применяют *релятивистский закон сложения скоростей*. Запишем этот закон для частного случая, — случая *сложения скоростей, направленных вдоль одной прямой*, например вдоль оси  $OX$  (рис. 24.3). Тогда *релятивистский закон сложения скоростей имеет вид*:

$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}},$$

где  $v_x$  — проекция скорости движения тела относительно неподвижной СО  $K$ ;  $v_{1x}$  — проекция скорости движения тела относительно подвижной СО  $K'$ ;  $v_{2x}$  — проекция скорости подвижной СО  $K'$  относительно неподвижной СО  $K$ .

Сравним релятивистский и классический законы сложения скоростей. Если рассматриваемые скорости много меньше скорости света ( $v_1 \ll c$ ,  $v_2 \ll c$ ),

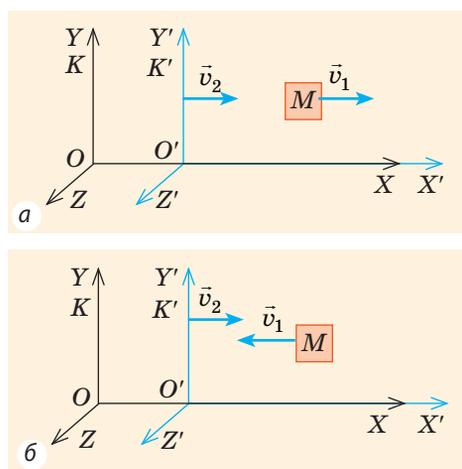
то  $1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2} \approx 1$  и релятивистский закон сложения скоростей принимает вид классического:  $v_x = v_{1x} + v_{2x}$ .

**?** Можно ли, рассматривая, например, движение автомобиля относительно поезда, воспользоваться релятивистским законом сложения скоростей? А стоит ли?

### 6 Учимся решать задачи

**Задача.** Докажите, используя релятивистский закон сложения скоростей, что, если перейти от одной инерциальной системы отсчета к другой, скорость распространения света не изменится.

*Анализ физической проблемы.* Для решения задачи необходимо выполнить пояснительный рисунок (мы воспользуемся рис. 24.3). Пусть квант света  $M$  движется со скоростью  $\vec{v}_1$  ( $v_1 = c$ ) вдоль оси  $O'X'$  системы отсчета  $K'$ , которая, в свою очередь, движется со скоростью  $\vec{v}_2$  в направлении оси  $OX$  системы отсчета  $K$ . Нам нужно определить скорость кванта относительно системы отсчета  $K$ .



**Рис. 24.3.** Тело  $M$  движется со скоростью  $\vec{v}_1$  относительно СО  $K'$ , которая, в свою очередь, движется со скоростью  $\vec{v}_2$  относительно СО  $K$ : а — направление движения тела совпадает с направлением оси  $O'X'$ ; б — направление движения тела противоположно направлению оси  $O'X'$

*Решение.* Рассмотрим два случая.

*Случай 1:* квант света движется по направлению оси  $O'X'$  (рис. 24.3, а).

*Случай 2:* квант света движется противоположно направлению оси  $O'X'$  (рис. 24.3, б).

Запишем релятивистский закон сложения скоростей:  $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$  (\*).

Найдем проекции скорости кванта ( $\vec{v}_1$ ) и скорости СО  $K'$  ( $\vec{v}_2$ ) на ось  $OX$ :

$$v_{1x} = v_1 = c, \quad v_{2x} = v_2.$$

$$v_{1x} = -v_1 = -c, \quad v_{2x} = v_2.$$

Подставив полученные выражения в формулу (\*), имеем:

$$v_x = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c + v_2}{\frac{c + v_2}{c}} = c.$$

$$v_x = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{v_2 - c}{1 - \frac{v_2}{c}} = \frac{v_2 - c}{\frac{c - v_2}{c}} = -c.$$

Таким образом, в любом случае скорость кванта света относительно СО  $K$  равна  $c$ ; знак «-» означает, что квант движется в направлении, противоположном направлению оси  $OX$ .

*Ответ:* скорость света не зависит от выбора системы отсчета.



### Подводим итоги

- В основе специальной теории относительности (СТО) лежат два постулата: 1) во всех инерциальных СО законы природы одинаковы; 2) скорость распространения света в вакууме одинакова во всех инерциальных СО; это максимально возможная скорость движения и распространения взаимодействия во Вселенной.

- Одновременность двух событий относительна: события, одновременные в одной инерциальной СО, не являются одновременными в инерциальных СО, движущихся относительно первой СО.

- В СТО для определения относительной скорости движения тел применяются релятивистский закон сложения скоростей:  $v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$ . Он принимает вид классического, когда скорости много меньше скорости света. В общем случае классическая механика Ньютона является частным случаем СТО.



### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности и объясните их смысл.
2. В чем отличие первого постулата СТО от принципа относительности в механике Ньютона?
3. Чему равна скорость распространения света в вакууме?
4. Что такое событие? Когда событие определено?
5. Что означает выражение «одновременность двух событий относительна»?
6. При каких скоростях релятивистский закон сложения скоростей принимает вид классического?



### Упражнение № 24

1. Два автомобиля движутся навстречу друг другу. Чему равна скорость распространения света, излучаемого фарами первого автомобиля, в СО, связанной со вторым автомобилем?

2. Ионизированный атом, вылетев из ускорителя со скоростью  $0,5c$  ( $c$  — скорость распространения света), выпустил фотон в направлении своего движения. Какова скорость движения фотона относительно ускорителя?
3. Космическая ракета удаляется от Земли со скоростью  $0,8c$ . Какую скорость относительно Земли будет иметь снаряд, выпущенный из ракеты со скоростью  $0,6c$  в направлении движения ракеты? в направлении, противоположном направлению движения ракеты?
4. Две ракеты удаляются друг от друга, двигаясь со скоростями  $0,7c$  относительно неподвижного наблюдателя. Определите: а) скорость движения ракет относительно друг друга; б) на сколько увеличивается каждую секунду расстояние между ракетами с точки зрения наблюдателя.
5. Выясните, что такое черные дыры и почему они существуют.

## § 25. СЛЕДСТВИЯ ПОСТУЛАТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

«Длительность или возраст существования вещей остается одним и тем же независимо от того, быстры движения или медленны, или их нет вообще», — писал И. Ньютон. Создатели классической механики считали очевидным, что и время, и размеры тела абсолютны и не зависят от скорости его движения. Настолько ли это очевидно с точки зрения релятивистской механики?

### 1 В чем заключается релятивистский эффект сокращения длины

Длиной стержня называют расстояние между его концами, координаты которых зафиксированы *одновременно* (по часам той системы, в которой измеряется длина). Поскольку одновременность двух событий относительна, то и длина стержня будет разной в разных СО.

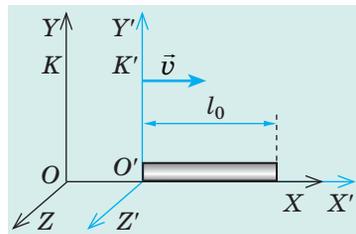
Пусть стержень покоится в СО  $K'$ , движущейся с некоторой скоростью  $v$  относительно СО  $K$ . Если стержень расположен вдоль линии движения системы  $K'$ , то согласно теории относительности имеет место *релятивистский эффект сокращения длины* (лоренцево сокращение длины) (рис. 25.1):

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $l_0$  — длина стержня в СО  $K'$ , относительно которой стержень покоится;  $l$  — длина стержня в СО  $K$ , относительно которой стержень движется.

*Обратите внимание!*

1. *Размеры тела уменьшаются только вдоль линии его движения:* если стержень расположен вдоль линии своего движения, то его длина уменьшается, а вот диаметр остается неизменным.



**Рис. 25.1.** Длина  $l$  стержня в СО  $K$ , относительно которой стержень движется, меньше «собственной» длины  $l_0$  стержня — длины стержня в СО  $K'$ , относительно которой стержень покоится

2. Релятивистский эффект сокращения длины становится заметным только при движении тела со скоростью, сравнимой со скоростью света: даже если ракета движется со второй космической скоростью ( $v=11,2$  км/с — наименьшая скорость, которую нужно сообщить ракете, чтобы она преодолела притяжение Земли и стала спутником Солнца), то ее длина почти не изменяется; а вот для частицы, разогнанной в ускорителе до скорости  $v=0,99c$ , эффект сокращения длины становится очень заметным.

**?** Докажите последнее утверждение самостоятельно.

**2 В чем заключается релятивистский эффект замедления времени**

Рассмотрим, как изменяется интервал времени между двумя событиями при переходе от одной инерциальной СО к другой. Для этого воспользуемся *световыми часами* — стержнем длиной  $L_0$ , на концах которого (перпендикулярно стержню) закреплены два зеркала (см. рис. 25.2, а). Световой импульс движется от одного зеркала к другому, и каждое отражение импульса от зеркала фиксируется.

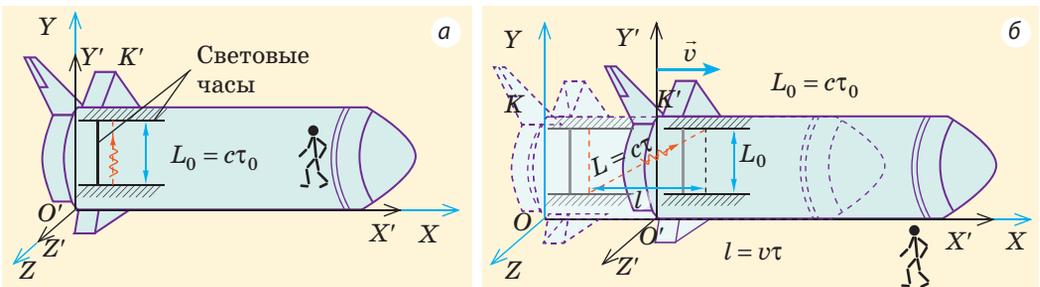
Наблюдатель, относительно которого часы находятся в покое, заметит, что время между двумя последовательными отражениями равно:  $\tau_0 = \frac{L_0}{c}$ .

Для наблюдателя, относительно которого часы движутся с некоторой скоростью  $v$ , световой импульс пройдет расстояние  $L > L_0$  (рис. 25.2, б), поэтому этот наблюдатель зафиксирует другое время между двумя отражениями:  $\tau = \frac{L}{c}$ . По теореме Пифагора:  $L^2 = l^2 + L_0^2$ , или:

$$(c\tau)^2 = (v\tau)^2 + (c\tau_0)^2 \Rightarrow \tau^2(c^2 - v^2) = c^2\tau_0^2 \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \Rightarrow \frac{\tau_0^2}{\tau^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}.$$

Отсюда время  $\tau$ , измеренное наблюдателем, относительно которого часы движутся, равно:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



**Рис. 25.2.** Измерение времени световыми часами: а — измерение собственного времени  $\tau_0$  события наблюдателем, движущимся вместе с часами; б — измерение времени  $\tau$  наблюдателем, относительно которого часы движутся, — для этого наблюдателя свет проходит большее расстояние, а следовательно, и за больший интервал времени:  $L > L_0 \Rightarrow \tau > \tau_0$

*Интервал времени  $\tau_0$ , отсчитываемый в СО, относительно которой часы находятся в состоянии покоя (собственное время события), меньше, чем интервал времени  $\tau$ , отсчитываемый в СО, относительно которой часы движутся. Другими словами, время в движущейся СО замедляется.*

**Обратите внимание!** Замедление времени покажут любые часы в подвижной СО. Эффект замедления времени — свойство самого времени. В подвижной СО замедляются все физические процессы, замедляется и процесс старения.

Замедление времени экспериментально наблюдается, например, при радиоактивном распаде ядер. Пусть в СО, относительно которой ядро покоится, среднее время жизни ядра равно  $\tau_0 = 0,1$  с. Если с помощью ускорителя разогнать ядро до такой скорости, что

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = 0,01 \text{ (то есть } v^2 = 0,99 c^2), \text{ среднее время жизни ядра составит: } \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{0,1 \text{ с}}{0,1} = 1 \text{ с.}$$

Таким образом, с точки зрения неподвижного наблюдателя ускоренные ядра радиоактивных веществ живут (не распадаются) в среднем дольше, чем такие же ядра в состоянии покоя.

### 3 Как связаны масса и энергия

Один из важнейших результатов СТО — установление связи энергии  $E$  тела с его массой: если тело массой  $m$  движется со скоростью  $v$  относительно некоторой СО, то энергия  $E$  тела в этой СО равна:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (*)$$

Эта формула прошла проверку в экспериментах по ускорению ядер, протонов, электронов. Из нее следует несколько важных следствий.

1. Любое тело (любая частица), имеющее массу, несет с собой запас энергии.

### «Парадокс близнецов»

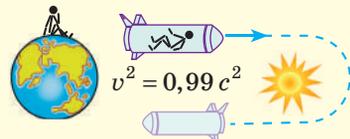
Для наглядности замедления темпов процессов в системах, движущихся с большими скоростями, А. Эйнштейн предложил яркий мысленный эксперимент.

Посадим одного из близнецов в ракету и разгоним ее до скорости  $v^2 = 0,99 c^2$ . Вернем его на Землю через один год по часам, работающим в ракете:  $\tau_0 = 1$  год. Часы на Земле покажут, что между двумя событиями — отлетом и прибытием ракеты — прошло:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1 \text{ год}}{0,1} = 10 \text{ лет.}$$

Таким образом, близнец, оставшийся на Земле, состарится больше, чем близнец, летевший в ракете со скоростью, близкой к скорости света.

Сделаем важное замечание: СТО рассматривает только инерциальные СО. СО, связанная с ракетой, которая улетает с Земли и затем на нее возвращается, не является инерциальной: ракета не менее трех раз ускоряется — при отлете, при развороте и при посадке. По этой причине непосредственно применять формулу замедления времени для ситуации с близнецами нельзя. Ее необходимо рассматривать методами общей теории относительности (ОТО). Отметим, что в ОТО «парадокс близнецов» сохраняется.



Действительно, даже если скорость тела (частицы) уменьшается до нуля ( $v=0$ ), согласно формуле (\*) тело все равно обладает энергией, — **энергией покоя**:

$$E = mc^2$$

- ?** Убедитесь, что энергия покоя огромна: вычислите, какая энергия «скрыта» в 1 г воды, и сравните ее с кинетической энергией грузовика массой 5 т, который мчит со скоростью 30 м/с.

2. *Изменение энергии тела прямо пропорционально изменению его массы:  $\Delta E = \Delta mc^2$ .* Передача неподвижному телу энергии всегда сопровождается увеличением его массы, и наоборот: выделение телом энергии сопровождается уменьшением его массы. Например, если тело нагревают, его масса увеличивается, а когда охлаждают, его масса уменьшается.

В полной мере формулу связи энергии и массы оценили в 1940-х гг., когда создавали атомную бомбу. Дело в том, что ядро Урана-235 распадается после захвата им медленного нейтрона, в результате чего выделяется энергия. Расчеты показали, что суммарная масса ядра Урана и нейтрона больше, чем общая масса частиц, которые образуются после распада. Этот *дефект массы* ( $\Delta m$ ) и выделяется в виде энергии.

3. В случаях, когда тело (частица) движется со скоростью много меньшей, чем скорость света ( $v \ll c$ ), формулу (\*) можно записать так:

$$E(v) = mc^2 + \frac{mv^2}{2},$$

где  $mc^2$  — энергия покоя;  $\frac{mv^2}{2}$  — кинетическая энергия тела (частицы).



### Подводим итоги

- Длина тела в разных СО различна. Наибольшую длину тело имеет в той СО, относительно которой оно покоится.
- Время в разных СО течет с разной скоростью. В подвижных СО время течет медленнее, чем в неподвижных.
- Энергия тела (частицы) связана с его (ее) массой и зависит от скорости  $v$  его (ее) движения:  $E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Если  $v=0$ , то  $E = mc^2$  — энергия

покоя тела (частицы).

покоя тела (частицы).



### Контрольные вопросы

1. В чем заключается релятивистский эффект сокращения длины? релятивистский эффект замедления времени? 2. Какое время называют собственным временем события? 3. Какой эксперимент подтверждает эффект замедления времени? 4. Приведите формулу зависимости энергии тела от его массы и скорости движения. Какой вид принимает эта формула при малых скоростях движения ( $v \ll c$ )? 5. Каков физический смысл величины  $mc^2$ ?



### Упражнение № 25

1. В ракете, движущейся относительно Земли со скоростью  $0,8c$ , прошло 2 года. Сколько времени прошло по подсчетам наблюдателя на Земле?
2. Длина стержня относительно неподвижного наблюдателя на Земле — 2 м. Какова собственная длина этого стержня, если он движется со скоростью  $0,6c$ ?
3. Во сколько раз замедляется время в ракете, движущейся относительно Земли со скоростью  $2,6 \cdot 10^8$  м/с?
4. Солнце каждую секунду излучает в космическое пространство  $3,83 \cdot 10^{26}$  Дж энергии. На сколько масса Солнца уменьшается за год?
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, в каких отраслях техники нужно обязательно учитывать эффект замедления времени.

## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА II «ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

1. Вы ознакомились с основными идеями релятивистской механики; с постулатами специальной теории относительности (СТО).

### Постулаты СТО

I. В инерциальных СО все законы природы одинаковы

II. Скорость распространения света в вакууме одинакова во всех инерциальных СО

2. Вы поняли, что скорость распространения света в вакууме является максимально возможной скоростью передачи какого-либо взаимодействия:

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3. Вы узнали об относительности одновременности событий.

**Одновременность двух событий, происходящих в разных точках пространства, относительна:** события, одновременные в одной инерциальной СО, не являются одновременными в инерциальных СО, движущихся относительно первой СО с некоторой скоростью

4. Вы ознакомились с законами релятивистской механики и узнали о следствиях постулатов СТО.

Закон взаимосвязи массы и энергии

$$E_0 = mc^2;$$

$$E(v) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Закон сложения скоростей в случае одномерной СО

$$v_x = \frac{v_{1x} + v_{2x}}{1 + \frac{v_{1x}v_{2x}}{c^2}}$$

Следствия постулатов СТО

Лоренцево сокращение длины

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Эффект замедления времени

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# РАЗДЕЛ III. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## ЧАСТЬ 1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

### § 26. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

«Если бы <...> все накопленные научные знания были уничтожены и к грядущим поколениям перешла только одна фраза, то какое утверждение принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это атомная гипотеза: все тела состоят из атомов, маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольших расстояниях, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому». Это слова *Ричарда Фейнмана*, лауреата Нобелевской премии по физике 1965 г., и они практически дословно повторяют идеи *Демокрита*, высказанные более 25 веков назад.

#### 1 Основные положения молекулярно-кинетической теории

**Молекулярно-кинетическая теория (МКТ)** — теория, рассматривающая строение вещества с точки зрения трех основных положений.

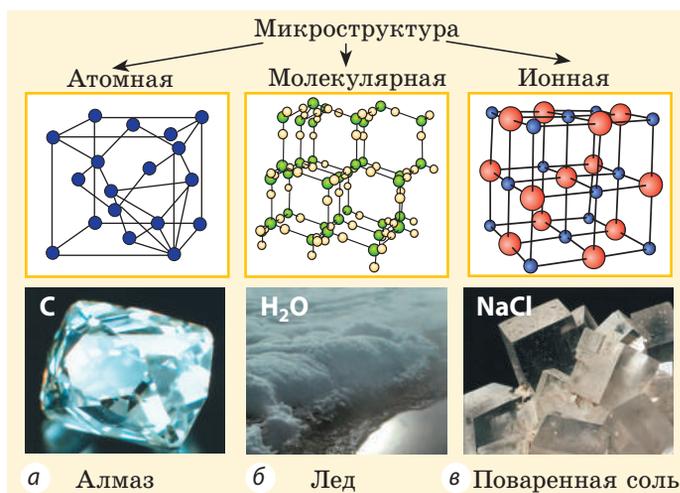
1. *Все вещества состоят из частиц* — атомов, молекул, ионов, то есть имеют дискретное строение; между частицами есть промежутки (рис. 26.1).

2. *Частицы вещества пребывают в непрерывном беспорядочном (хаотическом) движении*; такое движение называют *тепловым*.

3. *Частицы взаимодействуют друг с другом* (притягиваются и отталкиваются).

Вспомним определения основных структурных единиц вещества.

**Атом** — наименьшая частица, являющаяся носителем свойств химического элемента. Каждому химическому элементу соответствует атом, обозначаемый символом элемента (атом Гидрогена H, атом Карбона C, атом Урана U). Атом имеет сложную структуру и представляет собой ядро, окруженное облаком электронов. Число электронов в атоме равно числу протонов в его ядре. Заряд электрона по модулю равен заряду протона, поэтому атом электрически нейтрален. Объединяясь, атомы образуют молекулы.



**Рис. 26.1.** Микроструктура некоторых веществ в кристаллическом состоянии

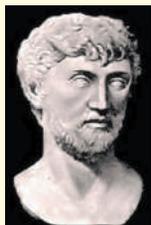
**Молекула** — наименьшая частица вещества, обладающая химическими свойствами этого вещества и состоящая из атомов. Молекулы разных веществ имеют разный атомный состав. Все огромное разнообразие веществ обусловлено различными сочетаниями атомов в молекулах.

Если атом (молекула) теряет один или несколько электронов, образуется **положительный ион**; если же к атому (молекуле) присоединились один или несколько электронов, образуется **отрицательный ион**.

## 2 Какие факты доказывают существование атомов и молекул

Мы не можем увидеть частицы вещества из-за их микроскопических размеров, однако еще философы древности приводили немало косвенных доказательств их существования.

**?** Прочитайте строки из поэмы римского поэта и философа *Тита Лукреция Кара* (ок. 99–55 гг. до н. э.), в которой он представил взгляды философов-атомистов древности. Какие доказательства существования атомов и молекул приводит Лукреций?

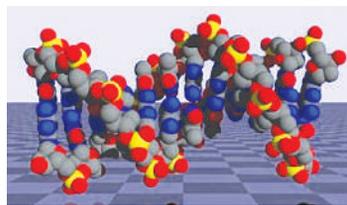


И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,  
Платье сыреет всегда, а на солнце вися, оно сохнет;  
Видеть, однако, нельзя, как влага на нем оседает,  
Да и не видно того, как она исчезает от зноя.  
Значит, дробится вода на такие мельчайшие части,  
Что недоступны они совершенно для нашего глаза.  
Так и кольцо изнутри, что долгое время на пальце  
Носится, из году в год становится тоньше и тоньше;  
Капля за каплей долбит, упадая, скалу; искривленный  
Плуга железный сошник незаметно стирается в почве <...>

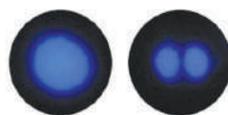
(Цит. по: Тит Лукреций Кар. *О природе вещей* / Пер. Ф. А. Петровского. — М.: Худ. лит., 1983)

Со временем появились доказательства существования частиц вещества, основанные на строгих количественных расчетах. Так, в конце XVIII в. был установлен закон кратных отношений: если два элемента, вступая в реакцию друг с другом, образуют несколько соединений, то разные массы одного элемента, соединяясь с неизменной массой второго элемента, соотносятся как небольшие целые числа. Например, азот и кислород дают три соединения:  $N_2O$ ,  $N_2O_2$ ,  $N_2O_5$ . При их образовании с неизменной массой азота массы кислорода, вступившего в реакцию, относятся как 1:2:5 соответственно. Это легко объяснить, сравнив состав молекул образовавшихся веществ.

Сейчас физики создали ряд приборов (ионные проекторы, электронные и туннельные микроскопы), позволяющих исследовать не только состав молекул (рис. 26.2), но и внутреннее строение атома (рис. 26.3).



**Рис. 26.2.** Структура молекулы ДНК, рассчитанная по данным, полученным с помощью туннельного электронного микроскопа



**Рис. 26.3.** Изображения электронных облаков атома углерода; впервые получены в 2009 г. в Харьковском физико-техническом институте

**Размеры молекул**

Размеры молекул настолько малы, что это трудно представить. Если молекулу воды ( $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м) увеличить в миллион раз, то она будет иметь размер точки ( $\approx 0,3$  мм). В результате такого же увеличения толщина волоса (0,1 мм) окажется равной 100 м, диаметр вишни (1 см) — 10 км, а средний рост человека (170 см) — 1700 км.

Чтобы продемонстрировать огромное количество молекул, английский физик *Уильям Томсон* (лорд *Кельвин*) предложил мысленный эксперимент: «Допустим, мы взяли стакан «меченых» молекул воды, вылили эту воду в Мировой океан и тщательно перемешали его. Затем зачерпнули стакан воды из океана на другом краю Земли и посчитали в ней все «меченые» молекулы. В стакане их окажется около тысячи!»



**?** Попробуйте проверить расчеты У. Томсона. Объем Мирового океана —  $1,34 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>.

**3 Насколько мала молекула**

Достаточно точно установлено: *размеры большинства молекул и диаметры всех атомов составляют порядка  $10^{-10}$  м*. Разумеется, что массы атомов и молекул тоже малы (порядка  $10^{-26}$  кг). Измерять их в таких единицах, как килограмм, очень неудобно, поэтому была принята *внесистемная единица — атомная единица массы*, равная 1/12 массы атома Карбона  $^{12}_6\text{C}$ :

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_0 \left( ^{12}_6\text{C} \right) \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Массу молекулы, представленную в атомных единицах массы, называют **относительной молекулярной массой**  $M_r$ :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_0 \left( ^{12}_6\text{C} \right)}$$

Относительная молекулярная масса показывает, во сколько раз масса  $m_0$  молекулы больше, чем 1/12 массы атома Карбона  $^{12}_6\text{C}$ .

**4 В каких единицах считают молекулы**

Макроскопические тела состоят из огромного количества частиц. Выясним, например, количество молекул в стакане воды ( $m = 0,2$  кг). Масса молекулы воды  $m_0 \approx 3,0 \cdot 10^{-26}$  кг. Следовательно, в стакане воды содержится:

$$N = \frac{m}{m_0} \approx 7 \cdot 10^{24} \text{ молекул!}$$

Считают такое огромное количество микрочастиц определенными «порциями» — молями. *1 моль любого вещества содержит одинаковое число частиц*, — столько, сколько атомов Карбона содержится в углероде массой 12 г. Это число называют **постоянной Авогадро**:  $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

Физическая величина, равная количеству молей частиц вещества, называется **количеством вещества**  $\nu$ :

$$\nu = \frac{N}{N_A},$$

где  $N$  — число частиц вещества.

*Единица количества вещества в СИ — моль:  $[\nu] = 1 \text{ моль (mol)}$ .*

Массу данного вещества, взятого в количестве 1 моль ( $6,02 \cdot 10^{23}$  молекул), называют **молярной массой  $M$  вещества**:

$$M = m_0 \cdot N_A,$$

где  $m_0$  — масса молекулы (атома) вещества.

**Единица молярной массы в СИ — килограмм на моль:**

$$[M] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \left( \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right).$$

**?** Получите формулы, представленные справа, самостоятельно.

### 5 Учимся решать задачи

**Задача.** Сколько свободных электронов находится в алюминиевом бруске размерами  $1 \times 4 \times 5$  см? Считайте, что каждый атом Алюминия дает один свободный электрон.

*Анализ физической проблемы.* По условию задачи количество электронов равно числу атомов Алюминия в бруске объемом  $20 \text{ см}^3$  ( $1 \times 4 \times 5$  см). Молярную массу алюминия найдем, воспользовавшись Периодической системой химических элементов:  $M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . Плотность алюминия найдем в таблице плотностей.

Дано:

$$V = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$N_A \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$N$  — ?

Решение

$$N = \frac{m}{M} N_A, \text{ где } m = \rho V \text{ — масса Алюминия.}$$

$$\text{Окончательно получим: } N = \frac{\rho V}{M} N_A = \frac{\rho V N_A}{M}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[N] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг}} = 1;$$

$$N = \frac{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3}} = 12 \cdot 10^{23}.$$

Ответ:  $N = 12 \cdot 10^{23}$ .

♦ Молярная масса равна относительной молекулярной массе, представленной в граммах:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

♦ Количество вещества массой  $m$  и молярной массой  $M$  можно определить по формуле:

$$\nu = \frac{m}{M}$$

♦ Число  $N$  молекул вещества равно:

$$N = \frac{m}{M} N_A$$



### Подводим итоги

- Все вещества состоят из частиц: атомов, молекул, ионов. Частицы разделены промежутками и очень малы: их размеры порядка  $10^{-10}$  м, масса — порядка  $10^{-26}$  кг. Массу микрочастиц принято измерять в атомных единицах массы:  $1 \text{ а. е. м.} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

- Количество частиц вещества огромно, поэтому их считают в молях. В одном моле любого вещества находится одинаковое число частиц — столько, сколько атомов Карбона содержится в углероде массой 12 г. Это число обозначают символом  $N_A$  и называют числом Авогадро (постоянной Авогадро):  $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

- Физическая величина, равная количеству молей частиц вещества, называется количеством вещества:  $\nu = \frac{N}{N_A}$ . Массу вещества, взятого в количестве 1 моль, называют молярной массой вещества:  $M = m_0 \cdot N_A$ .



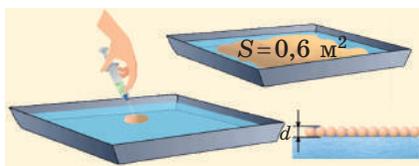
### Контрольные вопросы

1. Назовите основные положения МКТ.
2. Из каких частиц состоит молекула?
3. Какое строение имеет атом?
4. Перечислите известные вам прямые и косвенные доказательства существования атомов и молекул.
5. В каких единицах принято измерять массу молекул? количество молекул?
6. Каков физический смысл постоянной Авогадро?
7. Дайте характеристику таких физических величин, как количество вещества; молярная масса.



### Упражнение № 26

1. На поверхность воды капнули каплю оливкового масла объемом  $1 \text{ мм}^3$  (см. рисунок). Расплывшись, масло образовало пленку площадью  $0,6 \text{ м}^2$ . Оцените размер молекулы оливкового масла.
2. Сколько молекул содержится в воде объемом  $1,0 \text{ л}$ ?
3. Для каждого из указанных веществ определите молярную массу; число молекул в  $100 \text{ моль}$ ; количество молей в  $1 \text{ кг}$ ; массу одной молекулы: а) азот ( $\text{N}_2$ ); б) углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) в) метан ( $\text{CH}_4$ ).
4. В пруд, имеющий среднюю глубину  $2 \text{ м}$  и площадь водной поверхности  $15\,000 \text{ м}^2$ , бросили кристаллик йода массой  $6 \text{ мг}$ . Представьте, что воду в пруду перемешали и йод равномерно распределился по всему объему воды. Сколько атомов Йода оказалось бы в каждой пробе воды объемом  $200 \text{ см}^3$ ?
5. Придумайте или найдите интересные сравнения, иллюстрирующие, насколько малы атомы и молекулы.



### Экспериментальное задание

Проведите опыт, подобный изображенному на рисунке к упражнению № 26, и оцените размер молекулы масла экспериментально. *Подсказки:* 1) поверхность воды, по которой растекается капля, должна иметь достаточно большую площадь (не менее  $1 \text{ м}^2$ ); 2) объем капли можно найти с помощью шприца, посчитав, например, сколько капель содержится в  $1 \text{ мл}$  масла.

#### ПРОФЕССИИ БУДУЩЕГО

##### МЕДИЦИНА



##### Молекулярный диетолог

*специалист по разработке индивидуальных схем питания, основанных на данных о молекулярном составе пищи с учетом генетического анализа человека и особенностей его физиологических процессов*

Молекулярный диетолог рассматривает поведение молекул в определенных средах, их влияние на физиологические процессы в организме человека; рассчитывает затраты энергии при беге, ходьбе, плавании и другой двигательной нагрузке человека; определяет, какие именно продукты и в каком количестве нужны человеку для получения необходимой энергии.

## § 27. ДВИЖЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ\*



«...Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частички, почти мгновенно изменяя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные, но и они постоянно изменяют направление движения. Самые большие частицы практически толкутся на месте <...>. Нигде нет и следа системы или порядка...» Таким, по словам немецкого физика *Роберта Пола* (1884–1976), представляется наблюдателю *броуновское движение* — явление, которое объясняется движением молекул. Вспомним, как движутся молекулы, и факты, подтверждающие их взаимодействие.

### 1 Что такое броуновское движение\*

**Броуновское движение** — хаотическое движение видимых в микроскоп малых макрочастиц, взвешенных в жидкости или газе, которое происходит под действием ударов молекул.

Это явление названо в честь шотландского ботаника *Роберта Броуна* (1773–1858), который первым наблюдал его в 1827 г. Рассматривая в микроскоп взвешенные в воде частички пыльцы, Броун заметил, что они непрерывно движутся, постоянно изменяя скорость.

*Причина броуновского движения — хаотическое движение молекул жидкости или газа.* Двигаясь, молекулы среды непрерывно бомбардируют взвешенную в ней макрочастицу (рис. 27.1). Если суммарная сила ударов с одной стороны случайно окажется больше, чем с другой, то макрочастица может начать движение; потом другие толчки изменяют ее скорость.

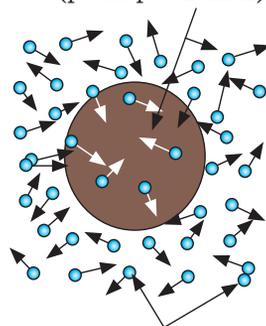
**?** Почему большие частицы «толкутся» на месте? Почему с увеличением температуры скорость движения броуновской частицы увеличивается?

Теория броуновского движения, созданная *А. Эйнштейном* и польским физиком *М. Смолуховским* в 1905–1906 гг. и экспериментально подтвержденная французским физиком *Ж. Перреном* (рис. 27.2), окончательно закрепила победу атомистики.

### 2 Что такое диффузия и где ее применяют

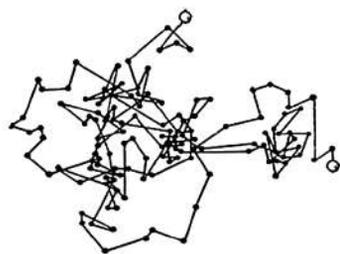
Непрерывное хаотическое движение молекул происходит внутри любого макроскопического

Броуновская частица  
(размер  $\approx 1$  мкм)



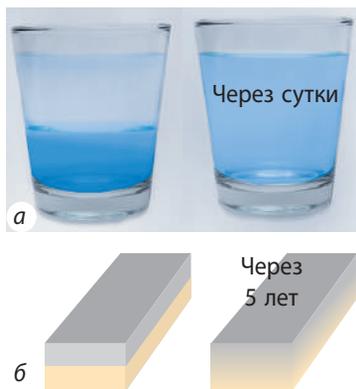
Молекулы среды

**Рис. 27.1.** Механизм возникновения броуновского движения



**Рис. 27.2.** Одна из тысячи схем, полученных Жаном Перреном, который обозначал положение броуновской частицы через равные (1 с) интервалы времени. Понятно, что реальная траектория движения частицы содержит еще больше звеньев

\* Здесь и далее термином «молекула» будем обозначать любую структурную единицу вещества: молекулу, атом или ион.



**Рис. 27.3.** Диффузия в жидкостях и твердых телах. Вследствие теплового хаотического движения молекул сироп смешался с водой в течение суток (а), две отшлифованные и прижатые друг к другу пластины свинца и золота «срослись» на 1 мм в течение 5 лет (б)



**Рис. 27.4.** Цементация — процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом. Если изготовить деталь из низкоуглеродистой стали, а затем поместить ее в высокотемпературную смесь, содержащую углерод, то благодаря диффузии поверхностный слой стали обогатится углеродом. Полученная деталь одновременно будет твердой (снаружи — крепкий чугун) и не будет разрушаться при ударных нагрузках (внутри — упругая сталь)

тела. В курсе физики 7 класса вы изучали *диффузию* — еще одно явление, обусловленное таким движением (от лат. *diffusio* — распространение, растекание).

**Диффузия** — процесс взаимного проникновения молекул одного вещества между молекулами другого, происходящий вследствие теплового движения молекул.

Если в стакан с водой налить подкрашенный сахарный сироп, спустя некоторое время вода в стакане окрасится и станет сладкой (рис. 27.3, а). Диффузия в жидкостях происходит довольно медленно, а в твердых телах она медленнее в сотни и тысячи раз (рис. 27.3). В газах диффузия протекает гораздо быстрее, чем в жидкостях, но все равно: если бы не было конвекции, запах духов распространялся бы в комнате часами. Отметим, что *в любых средах скорость диффузии увеличивается с повышением температуры и давления.*

Диффузные процессы очень важны для получения и обработки некоторых материалов. Диффузия в твердых телах обеспечивает соединение металлов при сварке, пайке, никелировании. С помощью диффузии поверхностный слой металлических изделий насыщают углеродом, обеспечивая их прочность (рис. 27.4).

Разновидностью диффузии является **осмос** (от греч. *ōstos* — толчок, давление) — процесс односторонней диффузии сквозь полупроницаемую перегородку (мембрану) молекул растворителя в сторону большей концентрации растворенного вещества. Например, если острым ножом отрезать дольку лимона, то сок практически не выделится; если посыпать дольку сахаром, то сок появится. Выделяясь из лимона, сок как бы стремится разбавить концентрированный раствор сахара, образовавшийся на срезе.

В природе благодаря осмосу питательные вещества и вода проникают из почвы в корни растений, из пищеварительного тракта — в организмы живых существ и непосредственно в клетки; кислород из легочных альвеол поступает в кровь и т. п. В промышленности осмос используют для очистки воды, производства напитков, получения некоторых полимеров.

### 3 Как быстро движутся молекулы

Молекулы в газах движутся очень быстро — со скоростью пули (см. таблицу), но далеко «улететь» не могут, поскольку ежесекундно испытывают более миллиарда столкновений с другими молекулами. Поэтому траектории движения молекул представляют собой сложные ломаные линии, подобные траектории движения броуновской частицы.

**?** Объясните, почему, несмотря на огромную скорость движения молекул, запах в воздухе распространяется довольно медленно.

*Обратите внимание!* В веществе всегда есть молекулы, движущиеся медленно, и молекулы, скорость движения которых огромна. В результате столкновений скорости молекул непрерывно изменяются. Описать движение даже одной молекулы невозможно, да и не нужно. Важно знать, к какому результату приводит движение всей совокупности молекул данного объекта.

Температура газа, °C	Средняя квадратичная скорость движения молекул газа, м/с		
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	1693	425	362
20	1755	440	376
100	1980	496	422
200	2232	556	475

#### Как была измерена скорость движения молекул

Впервые скорость движения молекул измерил немецкий физик *Отто Штерн* (1888–1969) в 1920 г.

Для опыта Штерн изготовил устройство (см. рис. 1), состоящее из двух жестко связанных пустых цилиндров, надетых на общую ось; стенка внутреннего цилиндра имела щель. Вдоль оси была натянута металлическая нить, покрытая слоем серебра. Воздух из цилиндров был откачан.

Когда по нитке пропускали ток, серебро испарялось и внутренний цилиндр заполнялся атомами Аргентума, часть которых проходила сквозь щель и оседала на внутренней стенке внешнего цилиндра. В результате напротив щели образовывалась тонкая полоска серебра (А на рис. 2).

При вращении цилиндров полоска серебра становилась размытой и образовывалась не напротив щели, а на определенном расстоянии  $s$  от полоски А (полоска А'). Ведь пока атомы Аргентума проходили расстояние  $l$  (см. рис. 2), цилиндры поворачивались. Чем быстрее двигались атомы, тем ближе к полоске А они оседали.

Зная радиусы цилиндров, угловую скорость  $\omega$  их вращения и измерив расстояние  $s$ , Штерн определил скорости  $v$  движения атомов Аргентума.

Действительно, время движения атомов от щели до внешнего цилиндра равно  $t = \frac{l}{v} = \frac{R_2 - R_1}{v}$ . За это время точка на поверхности внешнего цилиндра проходит расстояние  $s$ , поэтому  $t = \frac{s}{v_{\text{ц}}} = \frac{s}{\omega R_2}$ .

$$\text{Таким образом, } \frac{R_2 - R_1}{v} = \frac{s}{\omega R_2} \Rightarrow v = \frac{\omega R_2 (R_2 - R_1)}{s}.$$

Скорость движения атомов, измеренная Штерном, совпала со скоростью, рассчитанной теоретически.



Рис. 1

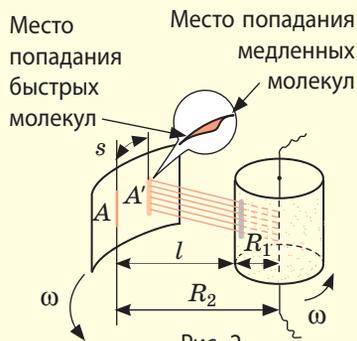
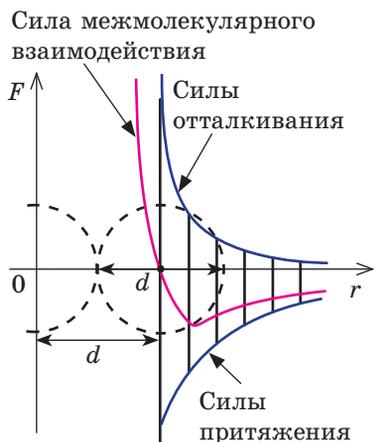


Рис. 2



**Рис. 27.5.** Графики зависимости сил притяжения, сил отталкивания и силы межмолекулярного взаимодействия от расстояния  $r$  между молекулами. Сила межмолекулярного взаимодействия находится как алгебраическая сумма сил отталкивания и сил притяжения

Если расстояние  $r$  между молекулами меньше размеров  $d$  самих молекул ( $r < d$ ), то преобладают силы отталкивания, поэтому молекулы отталкиваются друг от друга (рис. 27.5). По мере увеличения расстояния  $r$  убывают и силы притяжения, и силы отталкивания, но силы отталкивания убывают быстрее. При расстоянии  $r = d$  силы притяжения и силы отталкивания уравновешиваются. При дальнейшем увеличении расстояния между молекулами ( $r > d$ ) начинают преобладать силы притяжения и молекулы притягиваются друг к другу. Таким образом, на расстоянии  $r = d$  молекулы находятся в состоянии устойчивого равновесия: при отклонениях молекулы от этого положения межмолекулярные силы стремятся вернуть ее в состояние равновесия.

**?** Заметна ли сила взаимодействия между двумя молекулами, если расстояние между ними в десять раз больше размера молекул? в десять раз меньше (см. рис. 27.5)?

## 5 Фазовые состояния вещества

В МКТ различают три фазовых (агрегатных) состояния вещества: жидкое, кристаллическое, газообразное (существует и четвертое состояние — плазма, и оно самое распространенное во Вселенной, ведь именно в состоянии плазмы находится вещество в звездах). Изменение фазового состояния называют фазовым переходом. Рассмотрим разные фазовые состояния вещества и выясним особенности движения и взаимодействия молекул вещества в разных состояниях.

## 4 Как и почему взаимодействуют молекулы

Убедиться в том, что молекулы притягиваются друг к другу, достаточно просто. Попробуйте, например, разорвать стальную проволоку или разломить кирпич — это будет сложно, хотя предметы состоят из отдельных частиц. Тот факт, что твердые тела и жидкости не распадаются на отдельные молекулы, превращаясь в газ, тоже говорит о том, что между молекулами существуют силы притяжения. Вместе с тем молекулы отталкиваются друг от друга. В этом легко убедиться, попробовав сжать ту же проволоку или тот же кирпич, — вряд ли вам это удастся.

МКТ утверждает: *между молекулами одновременно существуют как силы притяжения, так и силы отталкивания*. Основная причина наличия этих сил — электрическое притяжение и отталкивание заряженных частиц, образующих атом: положительно заряженное ядро одного атома притягивается к отрицательно заряженному электронному облаку другого атома; вместе с тем и ядра атомов отталкиваются друг от друга, и электронные облака.

Фазовые (агрегатные) состояния вещества		
Газообразное	Жидкое	Твердое кристаллическое
<p>Слово «газ» происходит от греческого слова <i>chaos</i> («хаос»). Молекулы газов расположены беспорядочно и на расстояниях, которые в десятки раз больше размеров самих молекул. На таких расстояниях молекулы практически не взаимодействуют друг с другом. Непрерывно сталкиваясь, молекулы газов разлетаются во все стороны, пока не встретят какое-либо препятствие, например стенки сосуда. Именно поэтому <i>газы не имеют формы и занимают весь предоставленный объем</i>. Большими расстояниями между молекулами объясняется и тот факт, что газы легко сжимаются.</p>	<p>Молекулы жидкости в целом расположены хаотично, однако в расположении ближайших молекул сохраняется определенный (ближний) порядок. Среднее расстояние между молекулами примерно равно размерам молекул, и межмолекулярные силы удерживают их около положения равновесия. Каждая молекула жидкости некоторое время (порядка <math>10^{-11}</math> с) колеблется около положения равновесия, затем перескакивает в другое место и снова колеблется. Время «оседлой жизни» молекулы в сотни раз больше времени «перехода». Переходы молекул из одного равновесного состояния в другое происходят преимущественно в направлении внешней силы, поэтому <i>жидкости текучи: под действием внешних сил жидкость принимает форму того сосуда, в котором находится, при этом ее объем остается неизменным</i>.</p>	<p>В веществе, находящемся в твердом кристаллическом состоянии, молекулы расположены в определенном порядке (образуют кристаллическую решетку) на расстояниях, примерно равных размерам самих молекул, поэтому силы межмолекулярного взаимодействия удерживают их около положения равновесия. В отличие от жидкостей, перескакивания молекул в твердых телах происходят очень редко — каждая молекула сохраняет положение равновесия достаточно долго, а ее движение сводится к колебаниям около этого положения. Поэтому <i>твердые тела сохраняют и объем, и форму; как и жидкость, их очень трудно сжать</i>.</p>

Молекулы некоторых твердых тел в целом расположены беспорядочно. Такое состояние вещества называют **аморфным**. Вещества в аморфном состоянии напоминают очень вязкие жидкости. Так, если положить в сосуд кусочки смолы (аморфное вещество), со временем смола сольется и примет форму сосуда.

В отличие от кристаллических, *аморфные вещества не имеют определенной температуры плавления*, а переходят в жидкое состояние постепенно размягчаясь. Аморфное состояние веществ неустойчиво — постепенно происходит кристаллизация. Так, стекло имеет аморфную структуру, но со временем в нем образуются помутнения — кристаллики кварца. Сахар — это молекулярный кристалл. Если его расплавить и охладить, получим леденец — аморфное состояние сахара. Но через некоторое время в леденце начнут расти кристаллики сахара. Именно по этой причине засахаривается варенье.



### Подводим итоги

- Молекулы, атомы, ионы находятся в непрерывном хаотическом движении. Именно движением частиц вещества можно объяснить такие явления, как броуновское движение (видимое в микроскоп хаотическое перемещение малых макрочастиц, взвешенных в жидкости или газе) и диффузия (взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга).
- Частицы вещества взаимодействуют друг с другом. Основная причина межмолекулярного взаимодействия — электрическое притяжение и отталкивание заряженных частиц, образующих атом. На расстояниях, которые больше размеров молекул, молекулы притягиваются друг к другу; на расстояниях, которые незначительно меньше размера молекул, — отталкиваются.
- Вещество может находиться в твердом, жидком и газообразном фазовых (агрегатных) состояниях в зависимости от того, как расположены, как двигаются и как взаимодействуют его частицы.



### Контрольные вопросы

1. В чем причина броуновского движения? 2. Что такое диффузия? Приведите примеры проявлений и применения диффузии в технике, природе, жизни человека. 3. Верно ли утверждение, что скорости движения молекул данного газа при неизменной температуре одинаковы? 4. В чем причина межмолекулярного взаимодействия? 5. При каких условиях между молекулами проявляются силы межмолекулярного притяжения? отталкивания? 6. Назовите и объясните физические свойства веществ в разных фазовых состояниях. 7. В чем отличия аморфного и кристаллического состояний вещества?



### Упражнение № 27

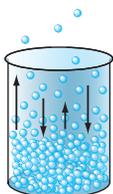
1. Почему углекислый газ, который мы выдыхаем, не остается около нас, а рассеивается в пространстве?
2. Каким физическим явлением объясняется процесс засолки огурцов? Как происходит этот процесс? В каком помещении — теплом или холодном — огурцы засаливаются быстрее?
3. Установлено, что сквозь стенки капилляров в организме человека перемещается 60 л жидкости в минуту. Благодаря какому физическому явлению это происходит?
4. Есть два способа подкормки растений: полив специальными растворами (прикорневые подкормки); опрыскивание (внекорневые подкормки). Объясните оба способа.
5. Если положить друг на друга два оконных стекла, их поверхности слипнутся (поэтому при хранении между стеклами кладут бумагу). Если прижать друг к другу две деревянные линейки, они не слипнутся. Почему?
6. Будет ли гореть свеча в космическом корабле? Если будет, то как долго? Обоснуйте свой ответ.
7. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и выясните, какое значение имеют процессы диффузии (в частности, осмоса) в кулинарии. Почему технология приготовления пищи требует понимания механизма этих процессов?



### Экспериментальное задание

Продумайте и проведите опыты по наблюдению диффузии и осмоса в домашних условиях. Выясните, от каких факторов зависит скорость диффузии.

## § 28. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА



Каждое макроскопическое тело состоит из огромного количества молекул. МКТ рассматривает строение и свойства макроскопических тел, а также процессы, происходящие в этих телах, с точки зрения их молекулярной структуры. Поведение макроскопических тел описывается рядом физических величин — *микроскопическими и макроскопическими параметрами*. Выясним, что это за параметры и как они связаны.

### 1 Микроскопические и макроскопические параметры

Рассмотрим систему, состоящую из очень большого количества атомов или молекул. Такой системой, например, может быть какой-либо газ. В любой момент времени каждая микрочастица газа обладает энергией, движется с некоторой скоростью, имеет массу.

Физические величины, характеризующие свойства и поведение отдельных микрочастиц вещества, называют **микроскопическими параметрами**.

Некоторые микроскопические параметры могут изменяться без внешнего воздействия на систему. Например, скорости движения молекул газа непрерывно изменяются в результате их столкновений друг с другом.

В то же время газ данной массы занимает некоторый объем, создает давление, имеет температуру. Значения этих физических величин определяются совокупностью множества молекул — например, мы не можем говорить о давлении, температуре или плотности одной молекулы.

Физические величины, характеризующие свойства и поведение макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называют **макроскопическими параметрами**.

Макроскопические параметры могут изменяться только за счет внешних воздействий на систему или за счет теплообмена. Так, чтобы увеличить давление газа, газ нужно нагреть (передать определенное количество теплоты) или сжать (то есть совершить работу).

### 2 Какой газ называют идеальным

Количественные закономерности, связывающие макроскопические и микроскопические параметры тел, достаточно сложны. Рассмотрим самый простой случай — достаточно разреженные газы (такими, например, являются обычные газы при нормальных условиях\*). В разреженных газах расстояние между молекулами во много раз превышает размеры самих молекул, поэтому эти молекулы можно считать материальными точками, а их взаимодействием, за исключением моментов соударения, можно пренебречь. Кроме того, свойства разреженных газов практически не зависят от их молекулярного состава, а столкновения молекул такого газа приближаются к упругим. Таким образом, вместо реальных газов можно рассматривать их физическую модель — *идеальный газ*.

\* Газ находится *при нормальных условиях*, если его давление 760 мм. рт. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па и температура 0 °С.

**Идеальный газ** — это физическая модель газа, молекулы которого принимают за материальные точки, не взаимодействующие друг с другом на расстоянии и упруго взаимодействующие в моменты столкновений.

### 3 Основное уравнение МКТ идеального газа

Начнем с такого микроскопического параметра, как *скорость движения молекул*. Обратим внимание на то, что бессмысленно рассматривать движение каждой отдельной молекулы и устанавливать скорость ее движения в данный момент времени, да это и невозможно: число молекул огромно, и за секунду каждая молекула изменяет скорость своего движения миллиарды раз. Поэтому физики используют средние значения скоростей молекул. Важнейшим в МКТ является понятие **средний квадрат скорости** ( $\overline{v^2}$ ):

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N},$$

где  $N$  — число молекул;  $v_1, v_2, \dots, v_N$  — скорости отдельных молекул.

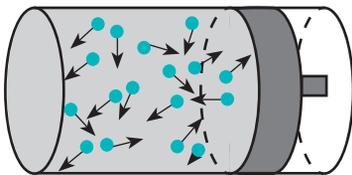
Квадратный корень из среднего квадрата скорости называют **средней квадратичной скоростью движения молекул** ( $\overline{v}_{\text{кв}}$ ):

$$\overline{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\overline{v^2}}$$

Понятно, что средний квадрат скорости (а следовательно, и среднюю квадратичную скорость) невозможно определить с помощью прямых измерений. Однако эта величина связана с определенными макроскопическими (измеряемыми) параметрами газа, например с давлением.

Напомним, что давление газа обусловлено ударами его молекул (рис. 28.1). Находясь в непрерывном хаотическом движении, молекулы газа сталкиваются со стенками сосуда и поверхностью любого тела в газе, действуя на них с некоторой силой. Суммарная сила воздействия частиц на единицу площади поверхности и есть давление газа:  $p = \frac{F}{S}$ . Нетрудно догадаться: чем быстрее движутся молекулы газа и чем больше масса этих молекул, тем сильнее будут их удары и тем большее давление создает газ.

Уравнение зависимости давления  $p$  идеального газа от массы  $m_0$  его молекул и среднего квадрата скорости  $\overline{v^2}$  их движения — это **основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа**:



**Рис. 28.1.** Давление газа является результатом столкновения молекул газа со стенками сосуда

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}$$

Здесь  $n$  — **концентрация молекул газа** — физическая величина, равная числу молекул в единице объема газа:  $n = \frac{N}{V}$ ,  $[n] = 1 \text{ м}^{-3}$ .

**?** Объясните, почему давление газа возрастает с увеличением концентрации молекул.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа (кинетическая энергия поступательного движения, в среднем приходящаяся на одну молекулу) равна:  $\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ . Поэтому основное уравнение МКТ идеального газа можно записать и так:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$$

- ?** Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул некоторого газа равна  $1,2 \cdot 10^{-21}$  Дж. Найдите кинетическую энергию поступательного движения всех молекул в 1 моль этого газа.

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача.** Определите плотность идеального газа, находящегося под давлением  $1,0 \cdot 10^5$  Па, если средняя квадратичная скорость движения его молекул 500 м/с.

Дано:  
 $p = 1,0 \cdot 10^5$  Па  
 $\bar{v}_{\text{кв}} = 500$  м/с  
 $\rho$  — ?

*Анализ физической проблемы, решение.* В задаче нужно найти макроскопический параметр — плотность газа. Для решения задачи воспользуемся основным уравнением МКТ идеального газа:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2. \quad (1)$$

Поскольку  $\rho = \frac{m}{V}$ , а  $m = N m_0$  (масса газа равна произведению числа молекул газа на массу одной молекулы), то  $\rho = \frac{N}{V} m_0 = \frac{N m_0}{V} = n m_0$ , где  $n = \frac{N}{V}$  — концентрация молекул газа.

Заменив в формуле (1) выражение  $n m_0$  на  $\rho$ , получим:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2 \quad (2)$$

Отсюда  $\rho = \frac{3p}{\bar{v}^2} = \frac{3p}{v_{\text{кв}}^2}$ . (Формулу (2) следует запомнить!)

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[\rho] = \frac{\text{Па}}{\text{м}^2/\text{с}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho = \frac{3 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{500^2} = \frac{3,0 \cdot 10^5}{2,5 \cdot 10^5} = 1,2 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

*Анализ результата.* Плотности газов при нормальных условиях колеблются от 0,09 до 1,5 кг/м<sup>3</sup>, то есть получен реальный результат.

**Ответ:**  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.



#### Подводим итоги

- Физические величины, характеризующие свойства и поведение отдельных микрочастиц вещества, называют микрокосмическими параметрами. Физические величины, характеризующие свойства и поведение макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называют макроскопическими параметрами.

• Идеальный газ — это физическая модель газа, молекулы которого принимают за материальные точки, не взаимодействующие друг с другом на расстоянии и упруго взаимодействующие в момент столкновения.

• Основное уравнение МКТ идеального газа связывает макроскопический параметр (давление) с микроскопическими параметрами (массой и средним квадратом скорости движения молекул):  $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$ . Это уравнение можно записать в виде:  $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$ ;  $p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$ .



### Контрольные вопросы

1. Дайте определения макроскопических и микроскопических параметров. Приведите примеры. 2. Дайте определение идеального газа. 3. Что такое средний квадрат скорости движения молекул? средняя квадратичная скорость движения молекул? 4. Почему газ давит на стенки сосуда? 5. Какие параметры связывает основное уравнение МКТ идеального газа? Запишите это уравнение. 6. Каким соотношением связаны давление и средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа? давление и плотность идеального газа?



### Упражнение № 28

1. Даны следующие параметры газа: давление; объем; температура; средняя квадратичная скорость движения молекул; масса молекулы; плотность.
- 1) Какие из этих параметров микроскопические? макроскопические?
  - 2) Отверстие пустого шприца без иглы зажали пальцем, а потом: а) медленно нажали на поршень; б) резко оттянули поршень. Какие из приведенных параметров газа и как при этом изменились?
2. Как изменилось давление идеального газа, находящегося в закрытом сосуде, если в результате нагревания средняя квадратичная скорость движения его молекул увеличилась в 2 раза?
3. В результате сжатия объем идеального газа уменьшился в 3 раза, а средняя кинетическая энергия его молекул возросла в 3 раза. Как изменилось давление газа?
4. Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа — 400 м/с. Какой объем занимает этот газ массой 2,5 кг, если его давление равно 1 атм?
5. Азот массой 2,5 кг в сосуде объемом 2,0 м<sup>3</sup> оказывает давление 1,5 · 10<sup>5</sup> Па. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул азота.

### Физика и техника в Украине

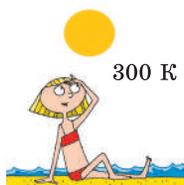


**Исаак Яковлевич Померанчук** (1913–1966) — украинский советский физик-теоретик, академик.

Начинал работать в Харьковском физико-техническом институте под руководством *Л. Д. Ландау*.

И. Я. Померанчук достиг выдающихся результатов в различных областях современной физики — в физике твердого тела (рассеивание нейтронов в кристаллах, теория теплопроводности диэлектриков); в физике квантовых жидкостей («эффект Померанчука»); в квантовой теории поля («теорема Померанчука»); в физике предельно высоких энергий, теории космических лучей. Ученый внес весомый вклад в теорию и создание первых ядерных реакторов, в частности в диффузионную теорию реактора. В честь И. Я. Померанчука названа псевдочастица *померон*.

## § 29. ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА КЕЛЬВИНА



Перед тем как, например, пойти на пляж, многие интересуются прогнозом погоды. И если ожидается температура воздуха  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то, скорее всего, планы будут изменены. А стоит ли отказываться от прогулки, если прогнозируется температура  $300\text{ К}$  (кельвинов)? И что на самом деле вкладывают физики в понятие «температура»?

### 1 Что такое температура

Эксперименты показывают, что макроскопическая система может переходить из одного состояния в другое. Например, если в морозный день занести в комнату шарик, наполненный гелием, то гелий в шарике будет нагреваться и при этом будут изменяться давление, объем и некоторые другие параметры газа. После того как шарик пробудет в комнате некоторое время, изменения прекратятся. Один из постулатов молекулярной физики и термодинамики — его еще называют **нулевое начало термодинамики** — гласит: *любое макроскопическое тело или система тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в термодинамическое равновесное состояние (состояние теплового равновесия), после достижения которого все части системы имеют одинаковую температуру*. Нулевое начало термодинамики фактически вводит и определяет понятие *температуры*.

**Температура** — физическая величина, характеризующая состояние теплового равновесия макроскопической системы.

**Состояние теплового равновесия** — это такое состояние макроскопической системы, при котором все макроскопические параметры системы остаются неизменными сколь угодно долго.

В состоянии теплового равновесия все части системы имеют одинаковую температуру; другие макроскопические параметры неизменны, но могут быть разными. Вспомните пример с шариком: после того как установится тепловое равновесие, температура окружающего воздуха и температура гелия в шарике будут одинаковыми, а давление, плотность и объем — разными.

### 2 Как работают термометры

Температура — это физическая величина, и ее можно измерять. Для этого нужно установить *шкалу температур*. Самые распространенные температурные шкалы — шкалы Цельсия, Кельвина, Фаренгейта (рис. 29.1).

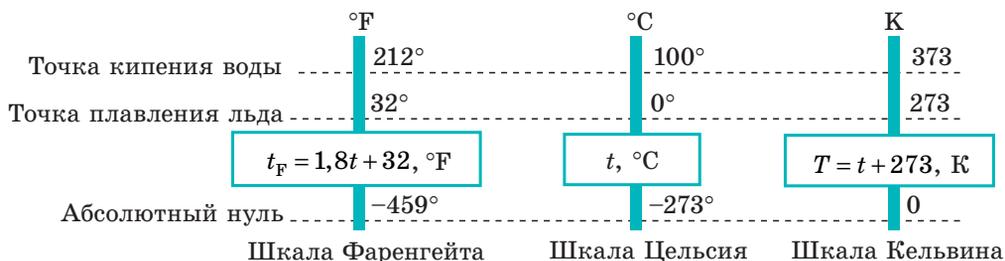
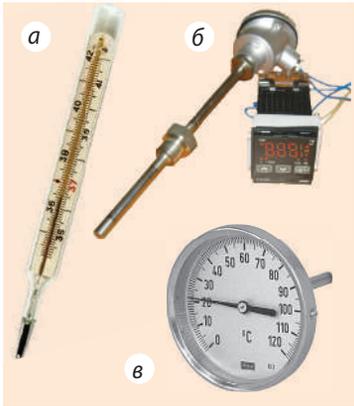


Рис. 29.1. Современные температурные шкалы



**Рис. 29.2.** Различные виды термометров:

*а* — жидкостный (принцип действия: изменение объема жидкости при изменении температуры);  
*б* — термометр сопротивления (изменение электрического сопротивления проводника при изменении температуры);  
*в* — биметаллический деформационный (изменение длин двух разных металлических пластин при изменении температуры)

Построение шкалы температур начинается с выбора *реперных (опорных) точек*, которые должны быть однозначно связаны с какими-либо физическими процессами, которые легко воспроизвести. Например, за *нулевую точку температурной шкалы Цельсия* принята *температура таяния льда* при нормальном атмосферном давлении ( $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ ). *Температуре кипения воды при нормальном атмосферном давлении приписывают значение  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$* . Единица температуры по шкале Цельсия — **градус Цельсия**:

$$[t] = 1\text{ }^\circ\text{C} (\text{ }^\circ\text{C}).$$

Приборы для измерения температуры — **термометры** (рис. 29.2). Основные части любого термометра — *термометрическое тело* (ртуть или спирт в жидкостном термометре, биметаллическая пластина в металлическом деформационном термометре и т. д.) и *шкала*. Если термометрическое тело привести в контакт с телом, температуру которого нужно измерить, система придет в неравновесное состояние. При переходе в равновесное состояние будут изменяться некоторые параметры термометрического тела (объем, сопротивление и т. п.). Зная, как эти параметры зависят от температуры, определяют температуру тела.

*Обратите внимание!*

- Термометр фиксирует *собственную температуру*, равную температуре тела, с которым термометр находится в термодинамическом равновесии.
- Термометрическое тело не должно быть массивным, иначе оно существенно изменит температуру тела, с которым контактирует.

### 3 Температура и средняя кинетическая энергия молекул

То, что температура тела должна быть связана с кинетической энергией его молекул, следует из простых соображений. Например, с увеличением температуры увеличивается скорость движения броуновских частиц, ускоряется диффузия, повышается давление газа, а это значит, что молекулы движутся быстрее и их кинетическая энергия становится больше. Можно предположить: *если газы находятся в состоянии теплового равновесия, средние кинетические энергии молекул этих газов одинаковы*. Но как это доказать, ведь непосредственно измерить эти энергии невозможно?

Обратимся к основному уравнению МКТ идеального газа:  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$ . По определению  $n = \frac{N}{V}$ , поэтому  $p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k$ . После преобразований получим:  $\bar{E}_k = \frac{3}{2} \frac{pV}{N}$ . Таким образом, чтобы экспериментально убедиться в равенстве

средних кинетических энергий молекул различных газов при одинаковой температуре, нужно измерить объемы ( $V$ ), давления ( $p$ ) и массы ( $m$ ) газов и, зная их молярную массу ( $M$ ), найти число молекул каждого

газа ( $N$ ) по формуле  $N = \frac{m}{M} N_A$ .

Чтобы обеспечить одинаковую температуру, можно, например, погрузить баллоны с различными газами в сосуд с водой и дождаться состояния теплового равновесия (рис. 29.3).

Эксперименты показывают, что для всех газов в состоянии теплового равновесия отношение  $\frac{pV}{N}$  одинаково, а следовательно, одинаковыми являются и средние кинетические энергии молекул газов. (Отношение  $\frac{pV}{N}$  часто обозначают символом  $\theta$  (тэта).)

Например, при температуре  $0^\circ\text{C}$  (сосуды с газами погрузили в тающий лед)  $\theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21}$  Дж, то есть  $\bar{E}_k = \frac{3}{2} \theta_0 = 5,64 \cdot 10^{-21}$  Дж; при температуре  $100^\circ\text{C}$  (сосуды погрузили в кипящую воду)  $\theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21}$  Дж, а  $\bar{E}_k = \frac{3}{2} \theta_{100} = 7,71 \cdot 10^{-21}$  Дж. Так как в состоянии теплового равновесия значение  $\theta$  для любых газов одинаково, то температуру можно измерять в джоулях.

#### 4 Абсолютная шкала температур

Понятно, что в джоулях представлять температуру неудобно (прежде всего потому, что значения  $\theta$  очень малы), к тому же неудобно полностью отказываться от шкалы Цельсия. В 1848 г. английский физик Уильям Томсон (лорд Кельвин) (1824–1907) предложил абсолютную шкалу температур (сейчас ее называют шкалой Кельвина).

Температуру  $T$ , измеренную по шкале Кельвина, называют абсолютной температурой.

Единица абсолютной температуры — кельвин — основная единица СИ:  
 $[T] = 1 \text{ К (К)}$ .

Шкала Кельвина построена следующим образом:

- изменение температуры по шкале Кельвина равно изменению температуры по шкале Цельсия:  $\Delta T = \Delta t$ , то есть цена деления шкалы Кельвина равна цене деления шкалы Цельсия:  $1^\circ\text{C} = 1 \text{ К}$ ; температуры, измеренные по шкалам Кельвина и Цельсия, связаны соотношениями:

$$T = t + 273; \quad t = T - 273$$

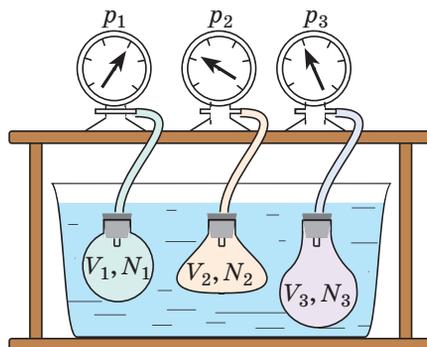


Рис. 29.3. Опыт, позволяющий установить связь между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа. Газы в сосудах находятся в состоянии теплового равновесия со средой, а следовательно, и друг с другом

**Постоянная Больцмана** названа в честь австрийского физика *Людвига Больцмана* (1844–1906). Ее значение можно определить, воспользовавшись данными для  $\theta_0$  и  $\theta_{100}$ , полученными в результате эксперимента (см. п. 3 § 29):

- ♦ если  $t = 100$  °С, то  $\theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21}$  Дж;
- ♦ если  $t = 0$  °С, то  $\theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21}$  Дж.

Поскольку  $\theta = kT$ , то  $\Delta\theta = k\Delta T$ , следовательно, но,  $k = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{\theta_{100} - \theta_0}{\Delta T}$ .

Учитывая, что  $\Delta T = \Delta t = 100$  К, а  $\theta_{100} - \theta_0 = 1,38 \cdot 10^{-21}$  Дж, получим:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

- температура по шкале Кельвина связана с величиной  $\theta = \frac{pV}{N}$  соотношением  $\theta = kT$ , где  $k$  — *постоянная Больцмана* — коэффициент пропорциональности, не зависящий ни от температуры, ни от состава и количества газа:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \left( \frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

Абсолютная температура имеет глубокий физический смысл: *средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре:*

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \quad (1)$$

То есть, если газ охладить до температуры  $T = 0$  К, движение его молекул должно прекратиться ( $\bar{E}_k = 0$ ). Таким образом, нулевая точка шкалы Кельвина — это самая низкая теоретически возможная температура. На самом деле движение молекул не прекращается никогда, поэтому достичь температуры 0 К (–273 °С) невозможно.

Абсолютный нижний предел температуры, при котором движение молекул и атомов должно прекратиться, называют **абсолютным нулем температуры**.

Давление  $p$  газа полностью определяется его абсолютной температурой  $T$  и концентрацией  $n$  молекул газа:  $p = nkT$  (2).

-  Воспользовавшись соотношением  $\frac{pV}{N} = \theta = kT$  и уравнением  $p = \frac{2}{3} n\bar{E}_k$ , прочтите формулы (1) и (2) самостоятельно.



### Подводим итоги

- Физическая величина, характеризующая состояние теплового равновесия макроскопической системы, называется температурой. Абсолютный нижний предел температуры, при котором движение молекул и атомов должно прекратиться, называют абсолютным нулем температуры. Шкала, за нулевую точку которой взят абсолютный нуль температуры, называется абсолютной шкалой температур (шкалой Кельвина). Единица абсолютной температуры — кельвин (К) — основная единица СИ. Температуры по шкале Кельвина и Цельсия связаны соотношением:  $T = t + 273$ ;  $t = T - 273$ .

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре, а давление газа определяется абсолютной температурой и концентрацией молекул газа:  $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$ ;  $p = nkT$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

**Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте нулевое начало термодинамики.
2. При каких условиях система находится в состоянии теплового равновесия?
3. Дайте определение температуры.
4. Какие виды термометров вы знаете? Каковы принципы их действия?
5. Охарактеризуйте температурные шкалы Цельсия и Кельвина. Как они связаны?
6. Докажите, что температура — мера средней кинетической энергии движения молекул.
7. Как связаны давление газа и абсолютная температура?

**Упражнение № 29**

1. Почему на шкале Кельвина отсутствуют отрицательные температуры?
2. Самая низкая температура на Земле ( $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) зафиксирована в Антарктиде в 1983 г. Представьте эту температуру в кельвинах; в градусах Фаренгейта.
3. Абсолютная температура газа, находящегося в закрытом баллоне, увеличилась в 4 раза. Как при этом изменились давление и средняя квадратичная скорость движения молекул газа?
4. Сколько молекул газа содержится в комнате объемом  $150\text{ м}^3$  при давлении 1 атм и температуре  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
5. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, узнайте: 1) какими были первые термометры; 2) почему после измерения температуры ртутный медицинский термометр следует встряхивать; 3) с какой точностью можно измерять температуру современными термометрами.

**i****§ 30. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ИЗОПРОЦЕССЫ**

Д. Менделеев    Б. Клапейрон

Уравнения Клапейрона и Менделеева — Клапейрона; законы Шарля, Гей-Люссака, Бойля — Мариотта, Авогадро, Дальтона, — пожалуй, такого количества «именных» законов нет ни в одном разделе физики. За каждым из них — кропотливая работа в лабораториях, тщательные измерения, длительные аналитические размышления и точные расчеты. Нам намного проще. Мы уже знаем основные положения теории, и «открыть» все вышеупомянутые законы нам не составит труда.

**1 Уравнение состояния идеального газа**

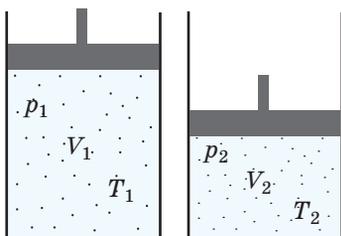
Давление газа полностью определяется его температурой и концентрацией молекул:  $p = nkT$ . Запишем данное уравнение в виде:  $pV = NkT$ . Если состав и масса газа известны, число молекул газа можно найти из соотношения  $N = \frac{m}{M}N_A$ . После подстановки получим:  $pV = \frac{m}{M}N_A kT$  (\*).

Произведение числа Авогадро  $N_A$  на постоянную Больцмана  $k$  называют **универсальной газовой постоянной (R)**:  $R = N_A k = 8,31\text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

Заменив в уравнении (\*)  $N_A k$  на  $R$ , получим **уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона\*)**:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \text{ или } pV = \nu RT$$

\* Названо в честь русского химика и физика *Дмитрия Ивановича Менделеева* (1834–1907) и французского физика *Бенуа Поля Эмиля Клапейрона* (1799–1864).



**Рис. 30.1.** К выводу уравнения Клапейрона

*Обратите внимание!* Состояние данного газа некоторой массы однозначно определяется двумя его макроскопическими параметрами; третий параметр можно найти из уравнения Менделеева — Клапейрона.

## 2 Уравнение Клапейрона

С помощью уравнения Менделеева — Клапейрона можно установить связь между макроскопическими параметрами газа при его переходе из одного состояния в другое. Пусть газ, имеющий массу  $m$  и молярную массу  $M$ , переходит из состояния  $(p_1, V_1, T_1)$  в состояние  $(p_2, V_2, T_2)$  (рис. 30.1). Для каждого состояния запишем уравнение Менделеева — Клапейрона:  $p_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1$ ;  $p_2 V_2 = \frac{m}{M} R T_2$ . Разделив обе части первого уравнения на  $T_1$ , а второго — на  $T_2$ , получим:  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R$ ;  $\frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R$ . Правые части этих уравнений равны; приравняв левые части, получим **уравнение Клапейрона**:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ то есть } \frac{pV}{T} = \text{const}$$

Для данного газа некоторой массы отношение произведения давления на объем к температуре газа является неизменным.

## 3 Изопроцессы

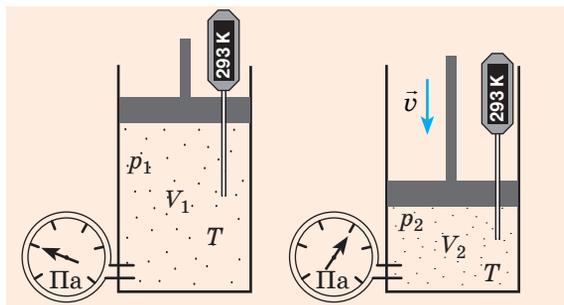
Процесс, при котором один из макроскопических параметров данного газа некоторой массы остается неизменным, называют **изопроцессом**. Поскольку состояние газа характеризуется тремя макроскопическими параметрами, возможных изопроцессов тоже три: происходящий при неизменной температуре; происходящий при неизменном давлении; происходящий при неизменном объеме. Рассмотрим их.

## 4 Какой процесс называют изотермическим. Закон Бойля — Мариотта

Пузырек воздуха, поднимаясь со дна глубокого водоема, может увеличиться в объеме в несколько раз, при этом давление внутри пузырька падает, поскольку вследствие дополнительного гидростатического давления воды ( $p_{\text{гидр}} = \rho g h$ ) давление на глубине больше атмосферного. Температура же внутри пузырька практически не изменяется. В данном случае имеем дело с процессом **изотермического расширения**.

**Изотермический процесс** — процесс изменения состояния данного газа некоторой массы, протекающий при неизменной температуре.

Пусть некий газ переходит из состояния  $(p_1, V_1, T)$  в состояние  $(p_2, V_2, T)$ , то есть **температура газа остается неизменной** (рис. 30.2). Тогда



**Рис. 30.2.** Изотермическое сжатие газа. Если медленно опускать поршень, температура газа под поршнем будет оставаться неизменной и равной температуре окружающей среды. Давление газа при этом будет увеличиваться

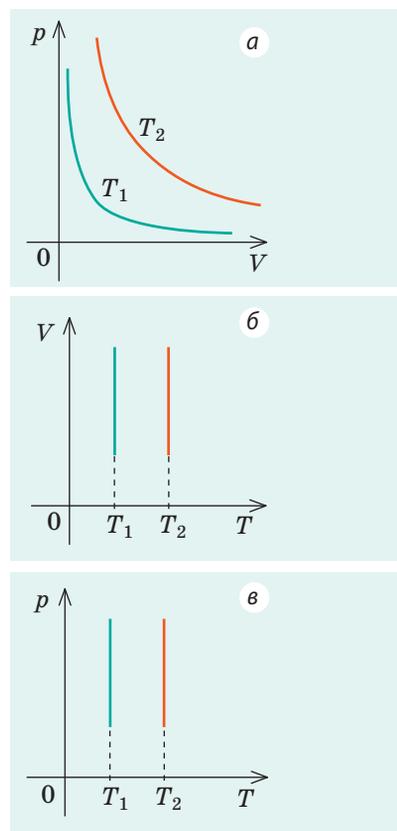
согласно уравнению Клапейрона имеет место равенство  $\frac{p_1 V_1}{T} = \frac{p_2 V_2}{T}$ . После сокращения на  $T$  получим:  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ .

**Закон Бойля — Мариотта\*:**

Для данного газа некоторой массы произведение давления газа на его объем остается постоянным, если температура газа не изменяется:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \text{ или } pV = \text{const} = \frac{m}{M} RT$$

Графики изотермических процессов называют изотермами. Как следует из закона Бойля — Мариотта, при неизменной температуре давление газа данной массы обратно пропорционально его объему:  $p = \frac{\text{const}}{V}$ . Эту зависимость в координатах  $p, V$  можно представить в виде гиперболы (рис. 30.3, а). Поскольку при изотермическом процессе температура газа не изменяется, в координатах  $p, T$  и  $V, T$  изотермы перпендикулярны оси температур (рис. 30.3, б, в).



**5 Какой процесс называют изобарным. Закон Гей-Люссака**

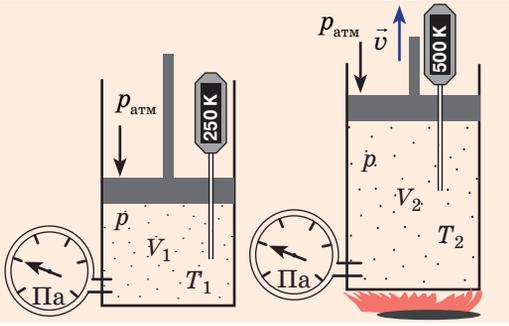
**Изобарный процесс** — процесс изменения состояния данного газа некоторой массы, протекающий при неизменном давлении.

Пусть некий газ переходит из состояния  $(p, V_1, T_1)$  в состояние  $(p, V_2, T_2)$ , то есть *давление газа остается неизменным* (рис. 30.4). Тогда имеет место равенство

$$\frac{pV_1}{T_1} = \frac{pV_2}{T_2}. \text{ После сокращения на } p \text{ получим: } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

\* Этот закон независимо друг от друга открыли ирландский физик и химик Роберт Бойль (1627–1691) в 1662 г. и французский физик Эдм Мариотт (1620–1684) в 1676 г.

**Рис. 30.3.** Графики изотермического процесса;  $T_1 < T_2$



**Рис. 30.4.** Изобарное расширение газа. Если газ находится под тяжелым поршнем массой  $M$  и площадью  $S$ , который может перемещаться практически без трения, то при увеличении температуры объем газа будет увеличиваться, а давление газа будет оставаться неизменным и равным  $p = p_{\text{атм}} + \frac{Mg}{S}$

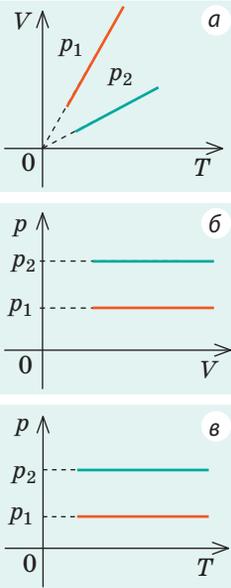
### Закон Гей-Люссака\*:

Для данного газа некоторой массы отношение объема газа к температуре остается постоянным, если давление газа не изменяется:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \text{ или } \frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m \cdot R}{M \cdot p}$$

Графики изобарных процессов называют **изобарами**.

Как следует из закона Гей-Люссака, при неизменном давлении объем газа данной массы прямо пропорционален его температуре:  $V = \text{const} \cdot T$ . График данной зависимости — прямая, проходящая через начало координат (рис. 30.5, а). По графику видно, что с приближением к абсолютному нулю объем идеального газа должен уменьшиться до нуля. Понятно, что это невозможно, поскольку реальные газы при низких температурах превращаются в жидкости. В координатах  $p, V$  и  $p, T$  изобары перпендикулярны оси давления (рис. 30.5, б, в).



**Рис. 30.5.** Графики изобарного процесса. Чем больше давление газа при изобарном процессе ( $p_2 > p_1$ ), тем меньший объем занимает газ и тем ниже расположена изобара

### 6 Изохорный процесс. Закон Шарля

Если газовый баллон сильно нагреется на солнце, давление в нем повысится настолько, что баллон может взорваться. В данном случае имеем дело с *изохорным нагреванием*.

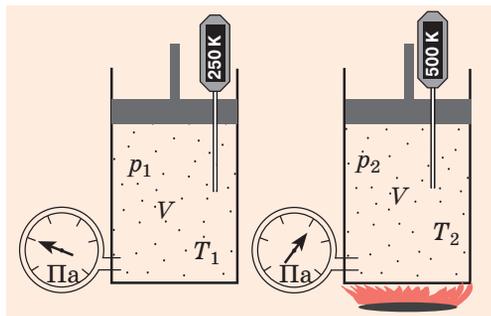
**Изохорный процесс** — процесс изменения состояния данного газа некоторой массы, протекающий при неизменном объеме.

**?** Существует ли процесс «изохорного расширения»?

Пусть некий газ переходит из состояния ( $p_1, V, T_1$ ) в состояние ( $p_2, V, T_2$ ), то есть объем газа не изменяется (рис. 30.6). В этом случае имеет место равенство

$$\frac{p_1 V}{T_1} = \frac{p_2 V}{T_2}. \text{ После сокращения на } V \text{ получим: } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

\* Данный закон экспериментально установил в 1802 г. французский физик *Жозеф Луи Гей-Люссак* (1778–1850).



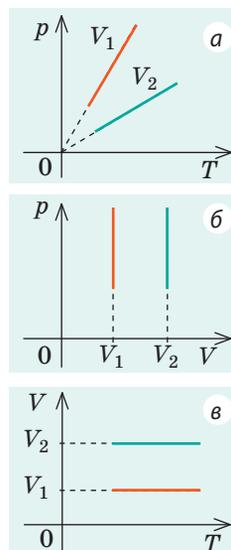
**Рис. 30.6.** Изохорное нагревание газа. Если газ находится в цилиндре под закрепленным поршнем, то с увеличением температуры давление газа тоже будет увеличиваться. Опыт показывает, что в любой момент времени отношение давления газа к его температуре неизменно:  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

**Закон Шарля\*:**

Для данного газа некоторой массы отношение давления газа к его температуре остается постоянным, если объем газа не изменяется:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \text{ или } \frac{p}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{V}$$

Графики изохорных процессов называют **изохорами**. Из закона Шарля следует, что при неизменном объеме давление газа данной массы прямо пропорционально его температуре:  $p = \text{const} \cdot T$ . График этой зависимости — прямая, проходящая через начало координат (рис. 30.7, а). В координатах  $p, V$  и  $V, T$  изохоры перпендикулярны оси объема (рис. 30.7, б, в).



**Рис. 30.7.** Графики изохорного процесса. Чем больше объем газа ( $V_2 > V_1$ ), тем меньше концентрация этого газа и тем меньшее давление он оказывает

**7 Учимся решать задачи**

**Задача 1.** В вертикальной цилиндрической емкости под легкоподвижным поршнем находится 2 моль гелия и 1 моль молекулярного водорода. Температуру смеси увеличили в 2 раза, и весь водород распался на атомы. Во сколько раз увеличился объем смеси газов?

Дано:  
 $\nu(\text{H}_2) = 1$  моль  
 $\nu(\text{He}) = 2$  моль  
 $T_2 / T_1 = 2$   
 $V_2 / V_1 = ?$

*Анализ физической проблемы.* Смесь газов находится под легкоподвижным поршнем, поэтому давление смеси не изменяется:  $p_1 = p_2$ , но использовать закон Бойля — Мариотта нельзя, так как вследствие диссоциации (распада) молярная масса и число молей водорода увеличились в 2 раза:  $\nu(\text{H}) = 2\nu(\text{H}_2)$ .

*Решение.* Воспользуемся уравнением состояния идеального газа:  $pV = \nu RT$ . Запишем это уравнение для состояний смеси газов до и после распада:  $p_1 V_1 = \nu_1 R T_1$  (1);  $p_2 V_2 = \nu_2 R T_2$  (2). Разделив уравнение (2) на уравнение (1) и учитывая, что  $p_1 = p_2$ , получим:  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{\nu_2}{\nu_1} \cdot \frac{T_2}{T_1}$ , где  $\nu_1 = \nu(\text{H}_2) + \nu(\text{He}) = 1 \text{ моль} + 2 \text{ моль} = 3 \text{ моль}$ ;

\* Данный закон экспериментально установил в 1787 г. французский ученый Александр Сезар Шарль (1746–1823).

$$v_2 = v(\text{H}) + v(\text{He}) = 2v(\text{H}_2) + v(\text{He}) = 2 \text{ моль} + 2 \text{ моль} = 4 \text{ моль}.$$

Найдем значение искомой величины:  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{4}{3} \cdot 2 = \frac{8}{3}$ .

Ответ: примерно в 2,7 раза.

**Задача 2.** На рис. 1 представлен график изменения состояния идеального газа неизменной массы в координатах  $V, T$ . Представьте график данного процесса в координатах  $p, V$  и  $p, T$ .

*Решение*

1. Выясним, какой изопроцесс соответствует каждому участку графика (рис. 1). Зная законы, которым подчиняются эти изопроцессы, определим, как изменяются макроскопические параметры газа.

Участок 1–2: изотермическое расширение;  $T = \text{const}$ ,  $V \uparrow$ , следовательно, по закону Бойля — Мариотта  $p \downarrow$ .

Участок 2–3: изохорное нагревание;  $V = \text{const}$ ,  $T \uparrow$ , следовательно, по закону Шарля  $p \uparrow$ .

Участок 3–1: изобарное охлаждение;  $p = \text{const}$ ,  $T \downarrow$ , следовательно, по закону Гей-Люссака  $V \downarrow$ .

2. Учитывая, что точки 1 и 2 лежат на одной изотерме, точки 1 и 3 — на одной изобаре, а точки 2 и 3 на одной изохоре, и используя результаты анализа, построим график процесса в координатах  $p, V$  и  $p, T$  (рис. 2).

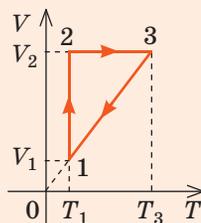


Рис. 1

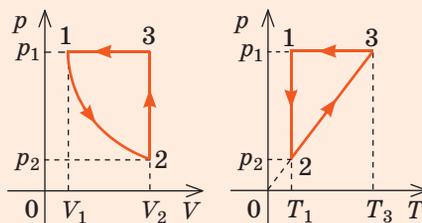


Рис. 2



### Подводим итоги

- Из соотношения  $p = nkT$  можно получить ряд важных законов, большинство из которых установлены экспериментально.

- Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона):  $pV = \frac{m}{M} RT$ ;  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  — универсальная газовая постоянная.

- Уравнение Клапейрона:  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ , или  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ .

- Законы, которым подчиняются изопроцессы, то есть процессы, при которых один из макроскопических параметров данного газа некоторой массы остается неизменным:

Изотермический, $T = \text{const}$	Изобарный, $p = \text{const}$	Изохорный, $V = \text{const}$
Закон Бойля — Мариотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$	Закон Гей-Люссака: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	Закон Шарля: $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$



### Контрольные вопросы

1. Какие макроскопические параметры связывает уравнение состояния идеального газа? 2. Запишите уравнение Клапейрона. 3. Что такое изопроцесс? 4. Приведите определения известных вам изопроцессов. Сформулируйте законы, которым они подчиняются. Опишите опыты, с помощью которых можно установить эти законы.



### Упражнение № 30

1. Как изменится давление газа, если его температуру увеличить в 2 раза, а объем уменьшить в 4 раза?
2. Определите глубину озера, если объем воздушного пузырька за время подъема со дна озера на его поверхность увеличивается в 3 раза. Атмосферное давление считайте нормальным, изменением температуры воздуха в пузырьке пренебрегите.
3. Перед поездкой водитель накачал шины автомобиля до давления 2 атм. Во время поездки температура воздуха в шинах увеличилась от 17 до 37 °С. Каким стало давление в шинах в конце поездки?
4. Изобразите процессы, представленные на графиках изменения состояния идеального газа (рис. 1), в координатах:  $V, T$  и  $p, T$  (рис. 1, а);  $p, V$  и  $p, T$  (рис. 1, б);  $V, T$  и  $p, V$  (рис. 1, в).
5. На рис. 2 представлен график изменения состояния идеального газа в координатах  $V, T$ . Изменяется ли давление этого газа? Если изменяется, то как?

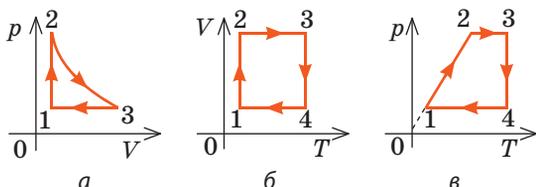


Рис. 1

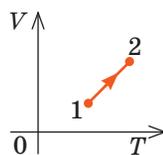


Рис. 2

6. Докажите закон Авогадро\*: в равных объемах газов при одинаковом давлении и одинаковой температуре содержится одинаковое число молекул.
7. Докажите закон Дальтона\*\*: давление смеси газов, не взаимодействующих друг с другом химически, равно сумме парциальных давлений\*\*\* этих газов:  

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_m.$$



### Экспериментальное задание

Продумайте и проведите ряд опытов, подтверждающих газовые законы, с использованием бумажного пакета из-под молока или сока. Например, если пустой пакет, находившийся при комнатной температуре, поместить в холодильник, объем воздуха в пакете значительно уменьшится (рис. 3).



Рис. 3

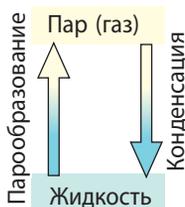
\* Закон Авогадро был сформулирован в 1811 г. итальянским физиком и химиком Амедео Авогадро (1776–1856).

\*\* Закон Дальтона был сформулирован в 1801 г. английским физиком и химиком Джоном Дальтоном (1766–1844).

\*\*\* Парциальное давление — давление, которое создавал бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы при той же температуре он один занимал объем, который занимает смесь.



## § 31. ПАРООБРАЗОВАНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР. КИПЕНИЕ



Любое вещество при определенных условиях может переходить из одного фазового (агрегатного) состояния в другое. Влажная одежда может «замерзнуть», а может высохнуть, водяной пар может собраться в капельки воды, образуя туман или росу, а может превратиться в иней. Вспомним, при каких условиях происходит переход вещества из жидкого состояния в газообразное и наоборот.

### 1 Какковы особенности испарения жидкости

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называют **парообразованием**.

Есть два способа перехода жидкости в газ: *испарение* и *кипение*.

**Испарение** — это процесс парообразования с поверхности жидкости.

С точки зрения МКТ парообразование — это такой процесс, когда с поверхности жидкости вылетают быстрые молекулы. Действительно, молекулы жидкости непрерывно движутся (колеблются около положений равновесия, время от времени перепрыгивают с места на место), но силы притяжения не дают им разлететься. Однако в жидкости всегда есть молекулы, кинетическая энергия которых в несколько раз превышает ее среднее значение. Когда эти «быстрые» молекулы оказываются на поверхности жидкости, их энергии хватает для того, чтобы, преодолев притяжение соседних молекул, покинуть жидкость.

Зная механизм испарения, отметим некоторые его особенности.

1. *Испарение происходит при любой температуре.* Чем выше температура жидкости, тем больше в ней «быстрых» молекул, поэтому *с увеличением температуры скорость испарения увеличивается*. Поскольку жидкость покидают молекулы, кинетическая энергия которых выше средней, то средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается, то есть *при отсутствии теплообмена процесс испарения вызывает охлаждение жидкости*.

2. *Испарение сопровождается поглощением энергии:* энергия расходуется на совершение работы против сил межмолекулярного притяжения и сил внешнего давления. Чем меньше давление на свободную поверхность жидкости, тем быстрее жидкость испаряется.

3. *Скорость испарения увеличивается при увеличении площади свободной поверхности жидкости* (на поверхности жидкости будет больше молекул с достаточной кинетической энергией).

4. *Разные жидкости испаряются с разной скоростью* (спирт испаряется почти мгновенно, вода — медленнее, а капля ртути будет испаряться годами, отравляя воздух). Очевидно, что медленнее испаряются те жидкости, молекулы которых сильнее взаимодействуют друг с другом.



Какие особенности испарения жидкости иллюстрирует каждая ситуация на рис. 31.1? Приведите собственные примеры.

## 2 Какой пар называют насыщенным

*Скорость испарения зависит от движения воздуха:* волосы быстрее высохнут, если их сушить феном; лужи после дождя быстрее исчезнут в ветреную погоду. Такую зависимость легко объяснить с точки зрения теплового движения молекул. Около поверхности жидкости всегда существует «облако» покинувших ее молекул, то есть пар этой жидкости. Молекулы пара беспорядочно движутся, сталкиваясь друг с другом и с молекулами других газов.

Благодаря диффузии и движению воздуха некоторые молекулы пара удаляются от поверхности жидкости и уже никогда в нее не возвращаются. Другие молекулы, наоборот, могут оказаться так близко к поверхности, что силы межмолекулярного взаимодействия «захватывают» их и возвращают в жидкость (см. рис. 31.2). Если бы молекулы, покинувшие жидкость, не возвращались, то скорость испарения была бы огромной. Например, при комнатной температуре ведро воды испарилось бы менее чем за час.

Таким образом, наряду с процессом испарения, в ходе которого жидкость переходит в пар, существует обратный процесс, в ходе которого вещество из газообразного состояния переходит в жидкое.

Процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое называют **конденсацией**.

Испарение сопровождается поглощением энергии; *при конденсации энергия выделяется*.

Закроем крышкой сосуд с некоторым объемом жидкости (рис. 31.2, б). Поверхность жидкости по-прежнему будут покидать «быстрые» молекулы, масса жидкости будет уменьшаться, а концентрация молекул пара — увеличиваться. Одновременно часть молекул будет возвращаться из пара в жидкость. Очень быстро концентрация молекул пара над жидкостью станет настолько высокой, что *число молекул, возвращающихся в жидкость, будет равно числу молекул, покидающих ее за то же время*, — между процессами конденсации и испарения установится **динамическое равновесие**.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.

*Обратите внимание!* Концентрация молекул насыщенного пара — наибольшая возможная концентрация молекул пара при данной температуре; пар, концентрация молекул которого меньше, чем в насыщенном, называют **ненасыщенным паром**.

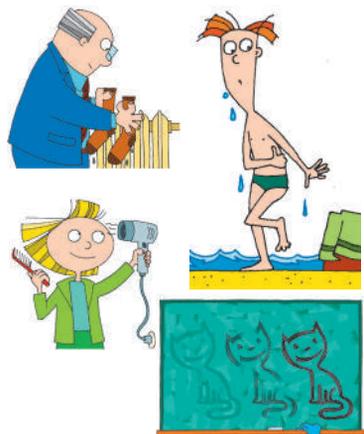


Рис. 31.1. К заданию в § 31

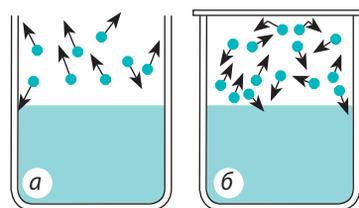
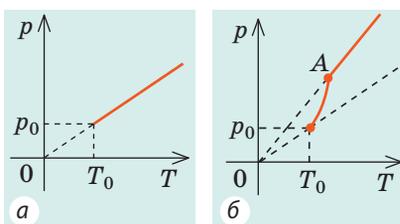


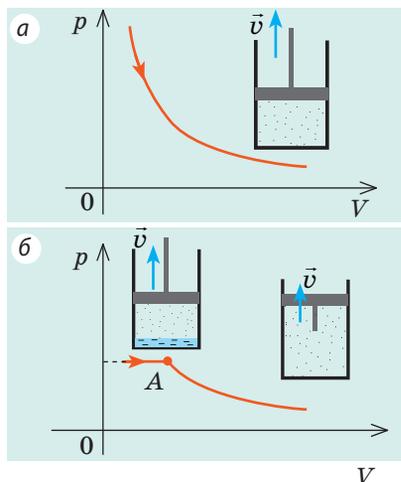
Рис. 31.2. Молекулы, покинувшие жидкость, могут снова вернуться в нее вследствие теплового движения: а — пар над поверхностью жидкости ненасыщенный; б — пар над поверхностью жидкости насыщенный

Таблица 1  
Давление насыщенного пара  
при 20 °С

Вещество	Давление, мм рт. ст.
Ртуть	0,0013
Вода	17,36
Хлороформ	160,5
Эфир	442,4
Хлор	5798 (7,63 атм)
Аммиак	6384 (8,4 атм)



**Рис. 31.3.** Зависимость давления от температуры: *а* — для идеального газа; *б* — для насыщенного пара (точка *А* соответствует полному испарению жидкости)



**Рис. 31.4.** Зависимость давления от объема: *а* — для идеального газа; *б* — для насыщенного пара. Точка *А* соответствует полному испарению жидкости; пар становится ненасыщенным, и его давление уменьшается обратно пропорционально объему

### 3 От каких факторов зависит давление насыщенного пара

Для насыщенного пара, как и для любого газа, справедливо равенство  $p = nkT$ .

То есть при данной температуре  $T$  давление  $p$  насыщенного пара прямо пропорционально концентрации  $n$  его молекул. Поскольку концентрация молекул насыщенного пара зависит от рода жидкости, то и *давление насыщенного пара зависит от рода жидкости* (табл. 1). Чем больше силы межмолекулярного взаимодействия, тем меньше концентрация молекул насыщенного пара и, следовательно, тем меньше его давление.

Кроме того, *давление насыщенного пара зависит от температуры*. При увеличении температуры давление насыщенного пара растет гораздо быстрее, чем давление идеального газа (рис. 31.3). Дело в том, что одновременно с ростом температуры увеличивается концентрация молекул пара.

*Обратите внимание!* Если повышение температуры приведет к полному испарению жидкости, то в дальнейшем пар станет ненасыщенным и его давление будет линейно зависеть от температуры.

*Давление, создаваемое насыщенным паром, — наибольшее давление, которое может создать пар данной жидкости при данной температуре.* Если уменьшить объем, занимаемый насыщенным паром, то на короткое время концентрация молекул пара увеличится, динамическое равновесие нарушится и число молекул, поступающих в жидкость, превысит число молекул, покидающих ее. Конденсация будет преобладать над испарением до тех пор, пока концентрация молекул пара не уменьшится до концентрации молекул насыщенного пара, а давление не станет равным давлению насыщенного пара. *С увеличением объема, занимаемого насыщенным паром, наоборот, будет преобладать процесс испарения, и в результате снова установится начальное давление.* Таким образом, в отличие от идеального газа, *давление насыщенного пара не зависит от его объема* (рис. 31.4).

#### 4 Как и почему кипит жидкость

Если к сосуду с жидкостью подвести достаточное количество теплоты, температура жидкости будет увеличиваться, а дно и стенки сосуда покроются пузырьками\*. Эти пузырьки содержат воздух и насыщенный пар, давление которых будет расти с ростом температуры. Как только давление газа внутри пузырьков превысит внешнее давление, пузырьки начнут увеличиваться в объеме (рис. 31.5, а). Наконец под действием архимедовой выталкивающей силы они оторвутся от дна сосуда и начнут всплывать; на месте оторвавшихся пузырьков останется небольшое количество газа — «зародыши» новых пузырьков (рис. 31.5, б).

Пока верхние слои жидкости чуть холоднее нижних, в верхних слоях часть водяного пара в пузырьках конденсируется и они «схлопываются». Этот процесс сопровождается шумом и образованием многочисленных мелких пузырьков газа — жидкость «кипит белым ключом».

Когда жидкость полностью прогреется, пузырьки, поднимаясь, увеличиваются в объеме, ведь в их середину непрерывно испаряется жидкость (рис. 31.5, в). Достигнув поверхности жидкости, пузырьки лопаются, выбрасывая пар в атмосферу; жидкость при этом бурлит и клокочет — *кипит* (рис. 31.5, г).

**Кипение** — процесс парообразования, который происходит по всему объему жидкости и сопровождается образованием и ростом пузырьков пара.

#### 5 От каких факторов зависит температура кипения жидкости

Продолжая нагревать уже кипящую жидкость, можно заметить, что во время кипения температура жидкости не изменяется (рис. 31.6). Если увеличить количество теплоты, подводимой к жидкости, то увеличится количество

\* На самом деле микропузырьки газа присутствуют в жидкости всегда, но заметны только при достаточно высокой температуре. Дело в том, что в начале нагревания жидкость насыщена газом, растворимость которого уменьшается с ростом температуры, и «лишний» газ выделяется внутрь пузырьков.

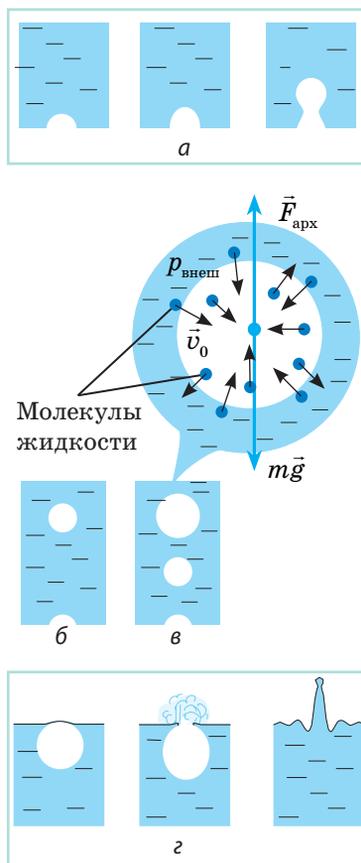


Рис. 31.5. Механизм кипения жидкости

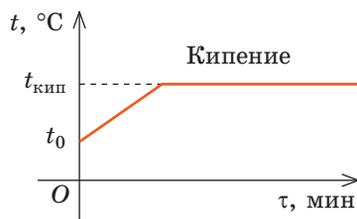
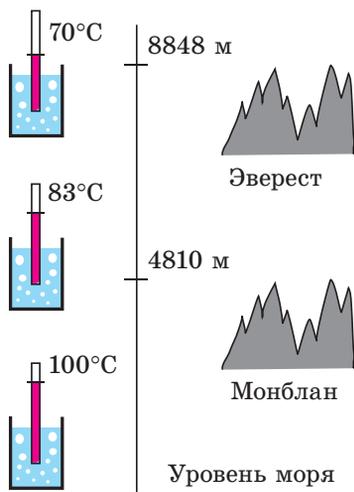


Рис. 31.6. График зависимости температуры жидкости от времени нагревания. После достижения температуры кипения температура жидкости не изменяется



**Рис. 31.7.** Температура кипения воды на разных высотах (и соответственно — при разном давлении)



**Рис. 31.8.** До высоких температур воду нагревают в автоклавах. При давлении свыше 100 атмосфер температура кипения воды увеличивается до 300 °С

Таблица 2

Температура кипения веществ при нормальном атмосферном давлении

Вещество	$t_{\text{кип}}, \text{ }^\circ\text{C}$
Водород	-253
Эфир	35
Спирт	78
Вода	100
Глицерин	290
Ртуть	357
Свинец	1740

пузырьков, то есть возрастет интенсивность парообразования. Таким образом, при кипении вся подводимая энергия идет на парообразование.

Жидкость начинает кипеть (пузырьки начинают увеличиваться в объеме) только тогда, когда давление газа в пузырьках ( $p_r$ ) становится чуть больше давления в жидкости ( $p_{\text{ж}}$ ). В пузырьках содержатся воздух и насыщенный пар, однако воздуха в них гораздо меньше, чем пара, поэтому давление газа в пузырьках примерно равно давлению насыщенного пара ( $p_{\text{н.п}}$ ):  $p_r \approx p_{\text{н.п}}$ . Давление в жидкости складывается из внешнего давления (давления на поверхность жидкости) ( $p_{\text{внеш}}$ ) и гидростатического давления столба жидкости ( $\rho gh$ ):  $p_{\text{ж}} = p_{\text{внеш}} + \rho gh$ . Если глубина сосуда меньше метра, то гидростатическим давлением жидкости можно пренебречь, поэтому  $p_{\text{ж}} \approx p_{\text{внеш}}$ .

**Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара не много превышает внешнее давление.**

Чем меньше внешнее давление, тем при более низкой температуре кипит данная жидкость (рис. 31.7). Если налить в колбу воду и насосом откачивать из колбы воздух, то вода закипит даже при комнатной температуре. И наоборот, если необходимо повысить температуру кипения жидкости, ее нагревают в условиях повышенного давления (рис. 31.8).

Поскольку давление насыщенного пара зависит от рода жидкости, то при одинаковом внешнем давлении каждое вещество имеет свою температуру кипения (табл. 2). Чем меньше силы межмолекулярного притяжения в жидкости, тем ниже температура ее кипения.

Температура кипения жидкости зависит от наличия в ней растворенного газа. Если долго кипятить воду и таким образом удалить из нее растворенный газ, то повторно при нормальном давлении эту воду можно будет нагреть до температуры выше 100 °С.



### Подводим итоги

- Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называют парообразованием. Парообразование может происходить двумя путями: испарением и кипением.

♦ Испарение — процесс парообразования с поверхности жидкости. Наряду с процессом испарения существует процесс конденсации — процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое.

♦ Кипение — процесс парообразования, происходящий по всему объему жидкости и сопровождающийся образованием и увеличением пузырьков пара. Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках немного превышает внешнее давление.

• Если за одинаковое время число молекул, вылетевших с поверхности жидкости, равно числу молекул, вернувшихся в жидкость, то жидкость и ее пар находятся в состоянии динамического равновесия. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют насыщенным.



### Контрольные вопросы

1. Что такое парообразование? Какие способы парообразования вы знаете?
2. Что называют испарением? Каковы особенности испарения?
3. От каких факторов и почему зависит скорость испарения? Приведите примеры.
4. Что такое конденсация?
5. В чем заключается состояние динамического равновесия?
6. Какой пар называют насыщенным?
7. От каких факторов и почему зависит давление насыщенного пара?
8. Дайте определение кипения и опишите этот процесс.
9. От каких факторов и почему зависит температура кипения жидкости?
10. Почему при кипении температура жидкости не изменяется?



### Упражнение № 31

1. Почему вода в открытом сосуде немного холоднее, чем окружающий воздух?
2. Приведите примеры испарения и конденсации воды в природе. Объясните эти явления. Объясните круговорот воды в природе.
3. Продолжительность варки мяса с момента закипания не зависит от мощности нагревателя. Почему? Почему в скороварке мясо готовится быстрее?
4. Почему образование тумана задерживает снижение температуры воздуха?
5. Можно ли кипением заставить воду замерзнуть? Если да, то как?
6. Кипит ли вода в кастрюле, плавающей в емкости с кипящей водой?
7. Узнайте, какими явлениями будет сопровождаться нагревание воды на космической станции в условиях невесомости.



### Экспериментальные задания

1. В шприц без иглы наберите воду примерно до половины, плотно закройте отверстие и резко потяните за поршень. Объясните наблюдаемые явления.
2. Удельную теплоту парообразования жидкости ( $L$ ) можно измерить достаточно точно, зная удельную теплоемкость ( $c$ ) жидкости и имея только комнатный термометр и часы.

Наполните небольшую кастрюлю водой комнатной температуры, закройте прозрачной крышкой и поставьте на газовую плиту (или электроплиту). Измерьте время ( $\tau_1$ ) нагревания воды от комнатной температуры ( $t_0$ ) до кипения ( $t$ ). После того как вода закипит, откройте крышку и, не меняя мощности ( $P$ ) нагревателя, измерьте время ( $\tau_2$ ) от начала кипения до полного испарения воды. Определите удельную теплоту парообразования воды по формуле:  $L = c(t - t_0) \frac{\tau_2}{\tau_1}$ .



Попробуйте получить представленную выше формулу самостоятельно. Обратите внимание на то, что мощность нагревателя неизменна.

## i

## § 32. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. ТОЧКА РОСЫ



Известно, что человек примерно на 70 % состоит из воды, при этом не все догадываются, что в жизни человека значительную роль играет уровень влажности атмосферы. Однако мы интуитивно чувствуем, что обычно влажный воздух полезен для здоровья, поэтому стремимся отдыхать на берегу моря, реки, озера. Выясним, от каких факторов зависит влажность воздуха и как ее можно изменить.

Таблица 1  
Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н.п}}, \text{кПа}$	$\rho_{\text{н.п}}, \text{г/м}^3$
0	0,61	4,8
2	0,71	5,6
4	0,81	6,4
6	0,93	7,3
8	1,07	8,3
10	1,23	9,4
12	1,40	10,7
14	1,60	12,1
16	1,81	13,6
18	2,07	15,4
20	2,33	17,3
22	2,64	19,4
24	2,99	21,8
26	3,36	24,4
28	3,79	27,2
30	4,24	30,3

## 1 Что такое влажность воздуха

Воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара. Содержание водяного пара в воздухе характеризуется *абсолютной и относительной влажностью*.

**Абсолютная влажность**  $\rho_a$  — физическая величина, которая характеризует содержание водяного пара в воздухе и численно равна массе водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха:

$$\rho_a = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V}$$

*Единица абсолютной влажности в СИ — килограмм на метр кубический:  $[\rho_a] = 1 \text{ кг/м}^3$  ( $\text{kg/m}^3$ ).*

Обычно абсолютную влажность приводят в  $\text{г/м}^3$ . В экваториальных широтах она может достигать  $30 \text{ г/м}^3$ , к полюсам Земли снижается до  $0,1 \text{ г/м}^3$ .

**Относительная влажность**  $\varphi$  — физическая величина, которая показывает, насколько водяной пар близок к насыщению, и равна выраженному в процентах отношению абсолютной влажности к плотности насыщенного водяного пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п}}} \cdot 100 \%$$

Плотность насыщенного водяного пара ( $\rho_{\text{н.п}}$ ) при данной температуре — величина постоянная, поэтому ее заносят в таблицы (табл. 1) или представляют в виде графиков (рис. 32.1). *Обратите внимание* на два момента.

1. По температуре и относительной влажности легко определить абсолютную влажность и массу водяного пара в воздухе:  $\rho_a = \rho_{\text{н.п}} \frac{\varphi}{100 \%}$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_a \cdot V$ .

Например, измерения показали, что в комнате объемом  $180 \text{ м}^3$  при температуре  $22^\circ\text{C}$   $\rho_a = 50 \%$ . В табл. 1 находим:  $\rho_{\text{н.п}}(22^\circ\text{C}) = 19,4 \text{ г/м}^3$ . Тогда:  $\rho_a = 19,4 \text{ г/м}^3 \cdot 0,5 = 9,7 \text{ г/м}^3$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 9,7 \text{ г/м}^3 \cdot 180 \text{ м}^3 = 1746 \text{ г} \approx 1,7 \text{ кг}$ .

2. Плотность водяного пара прямо пропорциональна его парциальному давлению  $p_a$  ( $\rho_a = \frac{p_a M}{RT}$ ) и концентрации  $n_a$  молекул пара ( $\rho_a = m_0 n_a$ ), поэтому

относительную влажность воздуха можно найти

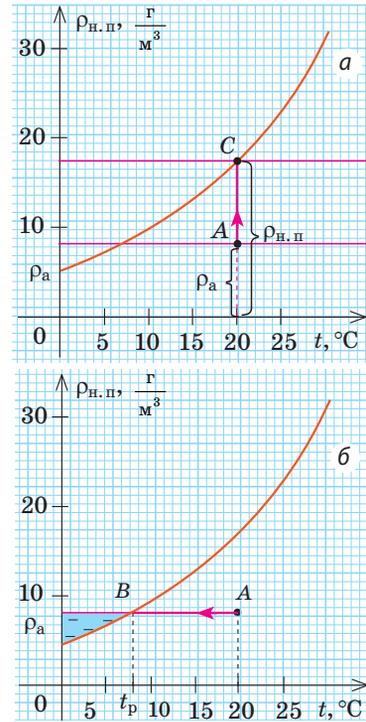
$$\text{из соотношений: } \varphi = \frac{p_a}{p_{н.п}} \cdot 100 \% ; \quad \varphi = \frac{n_a}{n_{н.п}} \cdot 100 \% .$$

## 2 Точка росы

Анализ графика на рис. 32.1, а показывает, что относительную влажность можно увеличить, увеличив абсолютную влажность, то есть увеличив массу водяного пара в воздухе. Если на кухне долго кипятить воду, то относительная влажность может достигнуть 100 % (точка С графика), а кафель покроется влагой.

Относительная влажность также увеличится, если уменьшить температуру воздуха (рис. 32.1, б). При температуре  $t_p$  (в точке В) пар становится насыщенным (относительная влажность достигает 100 %). В дальнейшем даже незначительное уменьшение температуры приведет к тому, что избыточный водяной пар будет конденсироваться и выпадать в виде росы или тумана. Так под утро, когда температура воздуха резко уменьшается, на траве выпадает роса, а над поверхностью водоемов появляется туман.

Температуру, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным, называют **точкой росы**  $t_p$ .



**Рис. 32.1.** Графики зависимости  $\rho_{н.п.}(t)$  — плотности насыщенного водяного пара от температуры;  $\rho_a$  — абсолютная влажность

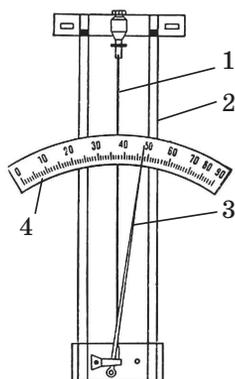
Зная точку росы, можно определить абсолютную и относительную влажности. Например, температура в комнате  $24^\circ C$ , а стенки сосуда с водой покрываются влагой при температуре воды  $16^\circ C$ , то есть при этой температуре пар становится насыщенным ( $t = t_p$ ). Это означает, что  $\rho_a = \rho_{н.п.}(16^\circ C) = 13,6 \text{ г/м}^3$  (см. табл. 1).

Поскольку  $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п.}} \cdot 100 \%$ , а  $\rho_{н.п.}(24^\circ C) = 21,8 \text{ г/м}^3$ , то  $\varphi = \frac{13,6}{21,8} \cdot 100 \% = 62,4 \%$ .

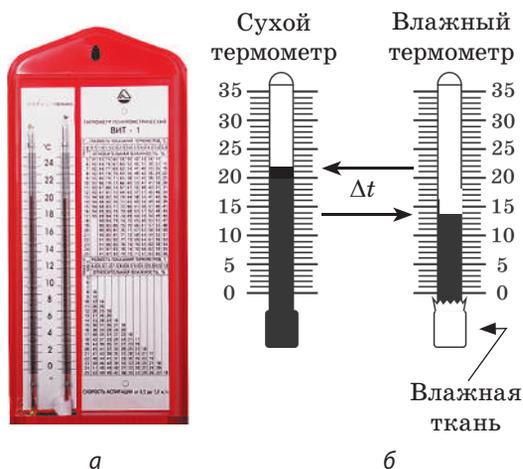
## 3 Как измерить влажность воздуха

Приборы для прямого измерения влажности воздуха называют **гигрометрами**. Наиболее часто употребляемые виды гигрометров — волосяной (волосной) и психрометрический. Принцип действия *волосяного гигрометра* (рис. 32.2) базируется на свойстве обезжиренного волоса увеличивать свою длину с увеличением влажности воздуха. Зимой волосяной гигрометр является основным прибором для измерения влажности воздуха вне помещений.

Чаще всего используют *гигрометр психрометрический* — *психрометр*. Его действие основано на двух фактах: 1) скорость испарения жидкости тем выше, чем ниже относительная влажность воздуха; 2) жидкость при испарении охлаждается. Психрометр состоит из двух термометров — *сухого*,



**Рис. 32.2.** Строение волосяного гигрометра: волос 1 натягивают на металлическую рамку 2; изменение длины волоса передается стрелке 3, которая перемещается вдоль шкалы 4



**Рис. 32.3.** Гигрометр психрометрический: а — вид; б — устройство

измеряющего температуру окружающей среды, и *влажного* — его колба обернута тканью, конец которой опущен в сосуд с водой (рис. 32.3). Вода из ткани испаряется, и влажный термометр показывает более низкую температуру, чем сухой. Чем ниже относительная влажность, тем быстрее испаряется жидкость и тем больше разница показаний сухого и влажного термометров. Относительную влажность определяют с помощью *психрометрической таблицы* (табл. 2). Например, сухой термометр показывает 15 °С, а влажный 10 °С; разность температур  $\Delta t = 5$  °С. Из табл. 2 видим, что  $\varphi = 52$  %.

**?** Какова относительная влажность, если оба термометра психрометра показывают одинаковую температуру?

Таблица 2

Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра $t$ , °С	Разность показаний сухого и влажного термометров $\Delta t$ , °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительная влажность $\varphi$ , %											
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

#### 4 Почему нужно следить за влажностью воздуха

Человек чувствует себя хорошо при относительной влажности 50–65 %. Для его здоровья вредны как чрезмерно сухой, так и очень влажный воздух. Избыточная влажность способствует размножению различных болезнетворных грибков. В сухом воздухе человек быстро утомляется, у него першит в горле, пересыхают губы, становится сухой кожа и т. п. Если воздух слишком сухой, то пыль, не связанная влагой, летает по всему помещению, и это особенно опасно для людей, страдающих аллергией. Недостаточная влажность приводит к гибели чувствительных к уровню влажности домашних растений; трещины на предметах из дерева, расстроенные музыкальные инструменты — тоже результат недостаточной влажности воздуха.

Влажность воздуха важно учитывать в ткацком, кондитерском и других производствах; при хранении книг и картин; в лечении многих болезней и т. д.



#### Подводим итоги

##### Физические величины, характеризующие влажность воздуха

Абсолютная влажность — плотность водяного пара, содержащегося в воздухе:

$$\rho_a = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V}; [\rho_a] = 1 \text{ г/м}^3.$$

Относительная влажность равна выраженному в процентах отношению абсолютной влажности к плотности насыщенного водяного пара при данной температуре:  $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{\text{н.п}}} \cdot 100 \%$ .

- Приборы для измерения влажности называют гигрометрами.
- Температуру, при которой относительная влажность воздуха достигает 100 %, то есть водяной пар в воздухе становится насыщенным, называют точкой росы.



#### Контрольные вопросы

1. Приведите характеристики абсолютной и относительной влажностей воздуха как физических величин. 2. Как можно увеличить относительную влажность? 3. Какие приборы для определения влажности воздуха вы знаете? Опишите устройство и принцип действия каждого из них. 4. Что называют точкой росы? Как, зная точку росы, определить абсолютную влажность? относительную влажность?



#### Упражнение № 32

1. Почему на холодной водопроводной трубе образуются капли воды?
2. Почему человек легче переносит жару, если воздух сухой?
3. Почему зимой, когда работает отопление, воздух в помещениях сравнительно сухой? Что нужно делать, чтобы поддерживать оптимальную влажность воздуха?
4. На стене помещения, внутренний объем которого  $100 \text{ м}^3$ , висит психрометр (см. рис. 32.3). Определите относительную и абсолютную влажности воздуха в помещении. Какова масса водяного пара в воздухе помещения? Какую массу воды нужно испарить, чтобы увеличить влажность до 50 %?
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, когда и почему следует увеличивать (уменьшать) влажность воздуха.



### Экспериментальное задание

«Гигрометр». Воспользовавшись металлической банкой с водой, спиртовым термометром и кусочками льда, определите влажность воздуха в вашей комнате.

1. Измерьте температуру в комнате.
2. Погрузите термометр в воду и постепенно охлаждайте ее, добавляя кусочки льда. Следите за поверхностью банки: как только она помутнеет (появятся мелкие капельки воды, то есть температура поверхности банки достигнет точки росы  $t_p$ ), измерьте температуру воды ( $t_p$ ).
3. Воспользовавшись табл. 1 в § 32, определите абсолютную и относительную влажности воздуха в комнате:

$$\rho_a = \rho_{н.п}(t_p); \quad \varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}} \cdot 100\%.$$



## i

### § 33. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ. СМАЧИВАНИЕ. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ



Некоторые виды пауков могут передвигаться по поверхности воды не проваливаясь, как будто эта поверхность покрыта невидимой тонкой пленкой. Такое же впечатление создается, если наблюдать за вытеканием воды из маленького отверстия — вода течет не тоненькой струйкой, а образует капли. Бумажная салфетка впитывает воду, едва коснувшись ее поверхности. Какая сила является причиной всех этих явлений?

#### 1

#### Каковы особенности поверхностного слоя жидкости

На свободной поверхности жидкости молекулы находятся в особых условиях, отличающихся от условий, в которых находятся молекулы внутри жидкости. Рассмотрим две молекулы — *A* и *B* (рис. 33.1): молекула *A* находится внутри жидкости, а молекула *B* — на ее поверхности. Молекула *A* окружена другими молекулами жидкости равномерно, поэтому силы, действующие на молекулу *A* со стороны молекул, попадающих в сферу межмолекулярного взаимодействия, скомпенсированы, то есть их равнодействующая равна нулю.

Молекула *B* с одной стороны окружена молекулами жидкости, а с другой — молекулами газа. Со стороны жидкости на нее действует гораздо больше молекул, чем со стороны газа, поэтому равнодействующая  $\vec{F}$  межмолекулярных сил направлена в глубь жидкости. Чтобы молекула из глубины попала в поверхностный слой, нужно совершить работу против межмолекулярных сил. Это означает, что *молекулы поверхностного слоя жидкости* (по сравнению с молекулами внутри жидкости) *обладают избыточной потенциальной энергией*. Эта избыточная энергия является частью внутренней энергии жидкости и называется *поверхностной энергией* ( $W_{пов}$ ).

Очевидно, что чем больше площадь  $S$  поверхности жидкости, тем больше поверхностная энергия:  $W_{пов} = \sigma S$ , где  $\sigma$  (сигма) — коэффициент пропорциональности, который называют *поверхностным натяжением жидкости*.

**Поверхностное натяжение жидкости** — физическая величина, которая характеризует данную жидкость и равна отношению поверхностной энергии к площади поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$$

Единица поверхностного натяжения в СИ — **ньютон на метр**:

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right).$$

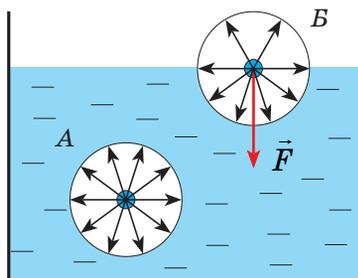
Поверхностное натяжение жидкости определяется силами межмолекулярного взаимодействия, поэтому оно зависит:

1) от *природы жидкости*: у летучих жидкостей (эфир, спирт, бензин) поверхностное натяжение меньше, чем у нелетучих (ртуть, жидкие металлы);

2) *температуры жидкости*: чем выше температура жидкости, тем меньше поверхностное натяжение;

3) *присутствия в составе жидкости поверхностно активных веществ* — их наличие уменьшает поверхностное натяжение;

4) *свойств газа, с которым жидкость граничит*. В таблицах обычно приводят значение поверхностного натяжения на границе жидкости и воздуха при определенной температуре (табл. 1).



**Рис. 33.1.** К введению понятия поверхностного натяжения жидкости

Таблица 1  
Поверхностное натяжение  $\sigma$  некоторых жидкостей

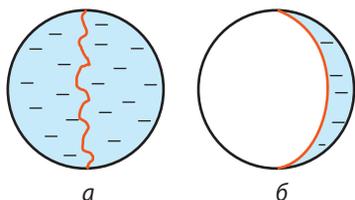
Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Вода (чистая)	20	0,0728
Раствор мыла	20	0,040
Спирт	20	0,0228
Эфир	25	0,0169
Ртуть	20	0,4650
Золото	1130	1,102
Водород	-253	0,0021
Гелий	-269	0,000 12

## 2 Сила поверхностного натяжения

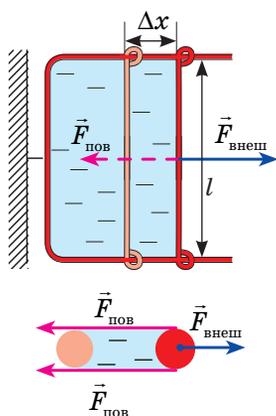
Поскольку поверхностный слой жидкости обладает избыточной потенциальной энергией ( $W_{\text{пов}} = \sigma S$ ), а любая система стремится к минимуму потенциальной энергии, то свободная поверхность жидкости стремится уменьшить свою площадь (сжаться). То есть вдоль поверхности жидкости действуют силы, которые пытаются стянуть эту поверхность. Эти силы называют *силами поверхностного натяжения*.

Наличие сил поверхностного натяжения делает поверхность жидкости похожей на натянутую резиновую пленку, однако упругие силы в резиновой пленке зависят от площади ее поверхности (от того, насколько пленка деформирована), а *поверхность жидкости всегда «натянута» одинаково, то есть силы поверхностного натяжения не зависят от площади поверхности жидкости*.

Наличие сил поверхностного натяжения можно доказать с помощью такого опыта. Если проволочный каркас с закрепленной на нем нитью опустить в мыльный раствор, каркас затянется мыльной пленкой, а нить приобретет



**Рис. 33.2.** Опыт, демонстрирующий наличие сил поверхностного натяжения



**Рис. 33.3.** На перекладину действуют три силы: внешняя сила  $\vec{F}_{\text{внеш}}$  и две силы поверхностного натяжения ( $\vec{F}_{\text{пов}}$ ), действующих вдоль каждой из двух поверхностей пленки:  
 $F_{\text{внеш}} = 2F_{\text{пов}}$



**Рис. 33.4.** Монетка удерживается на поверхности воды благодаря силе поверхностного натяжения. (Чтобы провести такой опыт, монетку нужно потереть между пальцев и осторожно опустить на поверхность воды.)

произвольную форму (рис. 33.2, а). Если осторожно проткнуть иглой мыльную пленку по одну сторону от нити, сила поверхностного натяжения мыльного раствора, действующая с другой стороны, натянет нить (рис. 33.2, б).

Опустим в мыльный раствор проволочную рамку, одна из сторон которой подвижна. На рамке образуется мыльная пленка (рис. 33.3). Будем растягивать эту пленку, действуя на перекладину (подвижную сторону рамки) с некоторой силой  $F_{\text{внеш}}$ . Если под действием этой силы перекладина переместится на  $\Delta x$ , то внешние силы совершат работу:

$$A = F_{\text{внеш}} \Delta x = 2F_{\text{пов}} \Delta x.$$

За счет совершения этой работы площади обеих поверхностей пленки увеличатся, а значит, увеличится и поверхностная энергия:

$$A = \Delta W_{\text{пов}} = \sigma \Delta S = \sigma \cdot 2l \Delta x,$$

где  $\Delta S = 2 \cdot l \Delta x$  — увеличение площади двух поверхностей мыльной пленки. Приравняв правые части полученных равенств, получим:  $2F_{\text{пов}} \Delta x = \sigma \cdot 2l \Delta x$ , или:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot l$$

Таким образом, *поверхностное натяжение  $\sigma$  численно равно силе поверхностного натяжения  $F_{\text{пов}}$ , которая действует на единицу длины  $l$  линии, ограничивающей поверхность:*

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$

С одним из методов определения поверхностного натяжения жидкости вы ознакомились, выполняя лабораторную работу № 7.

### 3 Где проявляется поверхностное натяжение

В жизни вы постоянно сталкиваетесь с проявлениями сил поверхностного натяжения. Так, благодаря ему на поверхности воды удерживаются легкие предметы (рис. 33.4) и некоторые насекомые (см. рисунок в начале § 33). Когда вы ныряете, ваши волосы расходятся во все стороны, но как только вы окажетесь над водой, волосы слипнутся, так как в этом случае площадь свободной поверхности воды намного меньше, чем при раздельном расположении прядей в воде. По этой же причине

можно лепить фигуры из влажного песка: вода, обволакивая песчинки, прижимает их друг к другу.

Стремлением жидкости уменьшить площадь поверхности объясняется и тот факт, что в условиях невесомости вода принимает форму шара, — при заданном объеме шарообразной форме соответствует наименьшая площадь поверхности. Форму шара приобретают тонкие мыльные пленки (мыльные пузыри). Поверхностным натяжением объясняется образование пены: пузырек газа, достигнув поверхности жидкости, имеет над собой тонкий слой жидкости; если пузырек мал, то архимедовой силы недостаточно, чтобы разорвать двойной поверхностный слой, и пузырек «застревает» вблизи поверхности. Благодаря поверхностному натяжению жидкость не выливается из маленького отверстия тоненькой струйкой, а капает (рис. 33.5), дождь не проливается через ткань зонта или палатки и т. д.

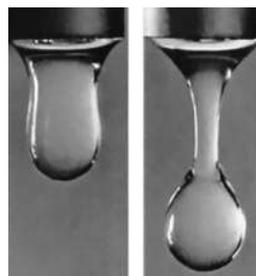
**?** Приведите другие примеры проявления поверхностного натяжения жидкостей.

#### 4 Почему одни жидкости собираются в капли, а другие растекаются

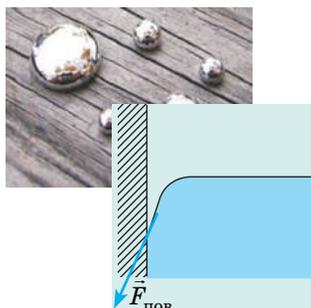
Наличие сил поверхностного натяжения проявляется в сферической форме мелких капелек росы, в каплях воды, разбегающихся по раскаленной плите, в капельках ртути на поверхности стекла. Однако при соприкосновении с твердым телом сферическая форма капли, как правило, не сохраняется. Форма свободной поверхности жидкости зависит также от сил взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела.

*Если силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, жидкость не смачивает поверхность твердого тела (рис. 33.6). Например, ртуть не смачивает стекло, а вода не смачивает покрытую сажей поверхность.*

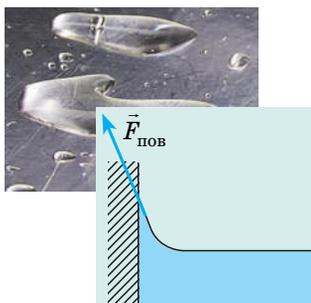
Если же капельку ртути поместить на цинковую пластину, то капелька будет стремиться растечься по поверхности пластины; так же ведет себя и капелька воды на стекле (рис. 33.7). Если силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше сил взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, жидкость смачивает поверхность твердого тела.



**Рис. 33.5.** Капля удерживается около небольшого отверстия до тех пор, пока сила поверхностного натяжения уравновешивает силу тяжести



**Рис. 33.6.** Капля несмачивающей жидкости принимает форму, близкую к сферической, а поверхность жидкости вблизи стенки сосуда является выпуклой



**Рис. 33.7.** Капля смачивающей жидкости стремится растечься по поверхности твердого тела, а вблизи стенки сосуда поверхность жидкости принимает вогнутую форму



**Рис. 33.8.** Капиллярные явления: *а* — смачивающая жидкость поднимается по капилляру; *б* — несмачивающая жидкость опускается в капилляре

### 5 Почему жидкость поднимается в капиллярах

В природе часто встречаются тела, пронизанные многочисленными мелкими капиллярами (от лат. *capillaris* — волосаяной) — узкими каналами произвольной формы. Такую структуру имеют бумага, дерево, почва, многие ткани и строительные материалы.

В цилиндрических капиллярах искривленная поверхность жидкости представляет собой часть сферы, которую называют *мениском*. У смачивающей жидкости образуется *вогнутый мениск* (рис. 33.8, *а*), а у несмачивающей — *выпуклый* (рис. 33.8, *б*). Поверхность жидкости стремится к минимуму потенциальной энергии, а искривленная поверхность обладает большей площадью по сравнению с площадью сечения капилляра, поэтому поверхность жидкости стремится выровняться и под ней возникает *избыточное (отрицательное или положительное) давление — лапласово давление* ( $p_{\text{изб}}$ ).

Под вогнутой поверхностью (жидкость смачивает капилляр) лапласово давление отрицательное и жидкость втягивается в капилляр. Так поднимаются влага и питательные вещества в стеблях растений, керосин по фитилю, влага в почве. Вследствие лапласового давления салфетки или ткань впитывают воду, брюки в дождливую погоду сильно намокают снизу и т. д. Под выпуклой поверхностью (жидкость не смачивает капилляр) лапласово давление положительное и жидкость в капилляре опускается. Чем меньше радиус капилляра, тем больше высота подъема (или опускания) жидкости (см. задачу ниже).

### 6 Учимся решать задачи

**Задача.** Капиллярную трубку радиусом  $r$  одним концом опустили в жидкость, смачивающую внутреннюю поверхность капилляра. На какую высоту поднимется жидкость в капилляре, если плотность жидкости  $\rho$ , а ее поверхностное натяжение  $\sigma$ ? Чему равно лапласово давление под вогнутой поверхностью капилляра? Смачивание считайте полным.

Дано:

$r$

$\rho$

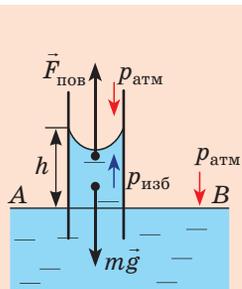
$\sigma$

$g$

$h$  — ?

$p_{\text{изб}}$  — ?

*Анализ физической проблемы.* На жидкость в капилляре действуют сила тяжести и сила поверхностного натяжения ( $\vec{F}_{\text{пов}}$ ) (см. рисунок). При полном смачивании  $\vec{F}_{\text{пов}}$  направлена вертикально вверх (по касательной к поверхности мениска). Подъем жидкости в капилляре будет продолжаться до тех пор, пока сила тяжести поднятого столба жидкости не уравновесит силу поверхностного натяжения:  $mg = F_{\text{пов}}$  (\*), где  $m$  — масса жидкости.



**Поиск математической модели, решение**

Поскольку  $m = \rho V$ , а объем воды в цилиндрическом капилляре  $V = \pi r^2 h$ , то  $m = \rho \pi r^2 h$ .  
 $F_{\text{пов}} = \sigma l$ , где  $l = 2\pi r$  (длина окружности), следовательно,  $F_{\text{пов}} = \sigma 2\pi r$ .

Подставим выражения для  $m$  и  $F_{\text{пов}}$  в равенство (\*):  $\rho \pi r^2 h g = \sigma 2\pi r$ , отсюда  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

Для определения лапласова давления  $p_{\text{изб}}$  под поверхностью мениска воспользуемся тем фактом, что в однородной неподвижной жидкости давление на одном уровне (у нас — на уровне  $AB$ ) одинаково, то есть:

$$p_{\text{атм}} + p_{\text{гидр}} + p_{\text{изб}} = p_{\text{атм}} \Rightarrow p_{\text{изб}} = -p_{\text{гидр}} = -\rho g h = -\rho g \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = -\frac{2\sigma}{r} = -\frac{2\sigma}{R},$$

где  $R$  — радиус кривизны мениска (при полном смачивании  $r=R$ ).

*Ответ: (Данные выводы следует запомнить!)*

♦ *Высота подъема жидкости в капилляре прямо пропорциональна поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорциональна плотности жидкости и радиусу капилляра:*  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

♦ *Лапласово давление (избыточное давление) под сферической поверхностью жидкости прямо пропорционально поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорционально радиусу кривизны мениска:*  $p_{\text{изб}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$ .

**Подводим итоги**

- Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости; эту энергию называют поверхностной энергией.

- Физическая величина, которая характеризует жидкость и равна отношению поверхностной энергии к площади поверхности жидкости, называется поверхностным натяжением жидкости:  $\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$ . Поверхностное натяжение также равно силе, которая действует на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости:  $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$ .

- Под искривленной поверхностью жидкости возникает избыточное (отрицательное или положительное) давление, благодаря которому жидкость поднимается в капиллярах, которые смачивает, и опускается в капиллярах, которые не смачивает. Высота подъема (опускания) жидкости в капилляре:  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

**Контрольные вопросы**

1. В чем особенности состояния молекул поверхностного слоя жидкости?
2. Что называют поверхностной энергией?
3. Почему жидкость стремится принять форму шара?
4. Дайте два определения поверхностного натяжения жидкости.
5. От каких факторов и почему зависит поверхностное натяжение жидкости? от каких факторов не зависит?
6. При каких условиях жидкость смачивает поверхность твердого тела? не смачивает?
7. В чем причина лапласова давления? Чему оно равно?
8. От каких факторов зависит высота подъема жидкости в капилляре?
9. Приведите примеры капиллярных явлений.



### Упражнение № 33

1. Почему волоски кисточки слипаются, когда ее вынимают из воды?
2. В капилляре вода поднимается на 0,5 м. Определите диаметр капилляра.
3. Определите избыточное давление внутри мыльного пузыря радиусом 5 см. (Следует помнить, что в мыльном пузыре две поверхности.)
4. Тонкое алюминиевое кольцо радиусом 7,8 см и массой 7 г касается мыльного раствора. Чтобы оторвать кольцо от поверхности раствора, нужно приложить силу 0,11 Н. Определите поверхностное натяжение мыльного раствора.
5. Какое количество энергии высвобождается при слиянии мелких капель ртути радиусом 0,2 мм в одну большую каплю радиусом 2 мм? Площадь шара равна  $4\pi r^2$ , объем шара —  $\frac{4}{3}\pi r^3$ .
6. Как вы думаете, когда на практике нужно увеличивать смачивание? В каких случаях его следует уменьшать? Узнайте, какие вещества используют для увеличения смачивания. Как уменьшают смачивание?



### Экспериментальное задание

Положите спичку на поверхность воды. С одной стороны спички осторожно добавьте каплю мыльного раствора. Объясните дальнейшее поведение спички. Определите модуль и направление силы, действующей на спичку.

## § 34. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ. АНИЗОТРОПИЯ КРИСТАЛЛОВ. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ



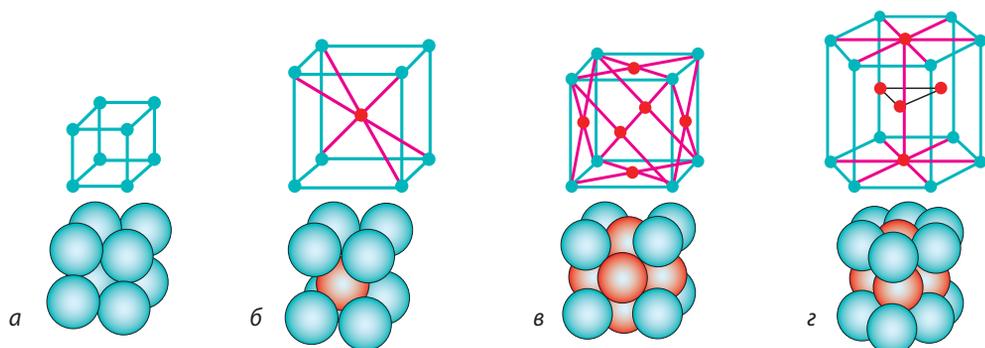
Большинство веществ на поверхности Земли находятся в твердом состоянии. Парта, за которой вы работаете, карандаш, который держите в руке, кости вашей руки и т. д. — это все твердые тела. Разговор о том, как расположены молекулы в твердых телах и какими свойствами обладают твердые тела в результате такого расположения, продолжим в этом параграфе.

### 1 Аморфные, — значит, не имеющие формы? Так ли это?

Вы уже знаете, что по структуре аморфные тела очень близки к жидкостям. Молекулы, атомы, ионы аморфных тел в целом расположены хаотично, и только внутри небольших локальных групп, содержащих всего несколько частиц, они расположены в определенном порядке (*ближний порядок*). Физические свойства аморфных тел (теплопроводность, электропроводность, прочность, оптические свойства и т. д.) одинаковы во всех направлениях — *аморфные тела изотропны*.

**Изотропия** (от греч. *isos* — равный и *tropos* — направление, свойство) — независимость физических свойств от направления, выбранного в теле.

Примерами аморфных тел могут быть стекло, различные затвердевшие смолы (янтарь), пластики и т. д. Аморфные тела определенное время сохраняют свою форму, однако при продолжительном воздействии они текут. Если аморфное тело нагревать, то оно размягчается постепенно и его переход в жидкое состояние занимает значительный интервал температур.



**Рис. 34.1.** Некоторые виды кристаллических решеток: *а* — простая кубическая; *б* — объемноцентрированная кубическая; *в* — гранецентрированная кубическая; *г* — гексагональная

## 2 Что такое полиморфизм

В кристаллических телах частицы вещества (атомы, молекулы, ионы) расположены в строго определенном порядке. Если соединить центры положений равновесия частиц кристаллического тела, то получится правильная пространственная решетка, которую называют *кристаллической*. Доказано, что существует 230 типов кристаллических решеток.

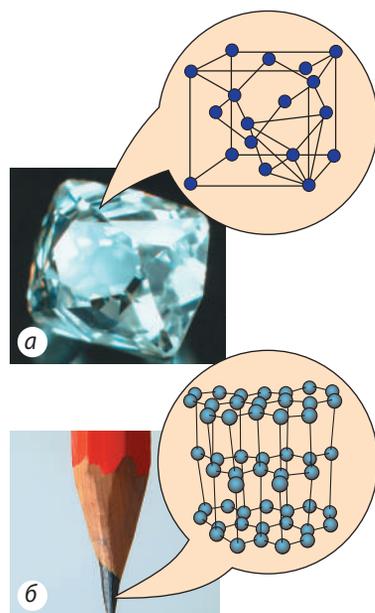
Например, в кристалле полония ионы Полония расположены в вершинах куба, образуя *простую кубическую решетку* (рис. 34.1, *а*).

Ионы чистого Феррума при комнатной температуре размещены в вершинах куба, кроме того, один ион расположен в центре куба — это *объемноцентрированная кубическая решетка* (рис. 34.1, *б*).

Если нагреть железо до 906 °С, то расположение ионов Феррума резко изменится — решетка перестроится. Центральные ионы сместятся, а в середине каждой грани куба появится дополнительный ион — это *гранецентрированная кубическая решетка* (рис. 34.1, *в*). В такой решетке частицы упакованы более плотно, чем в объемноцентрированной. Плотная упаковка наблюдается также в *гексагональной решетке* (рис. 34.1, *г*).

**Обратите внимание!** Частицы в кристаллах плотно упакованы, расстояния между их центрами примерно равны размеру частиц (электронные облака частиц соприкасаются), а вот в изображении кристаллических решеток часто указывают только положения равновесия частиц.

Многие кристаллические вещества имеют одинаковый химический состав, однако из-за различной структуры кристаллической решетки отличаются своими физическими свойствами (рис. 34.2). Такое явление называют **полиморфизмом**, а переход из одной кристаллической структуры в другую — **полиморфным переходом**.



**Рис. 34.2.** Различные кристаллические состояния углерода: *а* — алмаз; *б* — графит

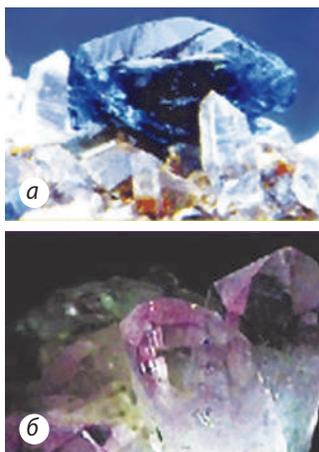


Рис. 34.3. Природные кристаллы: а — лазурит; б — кварц

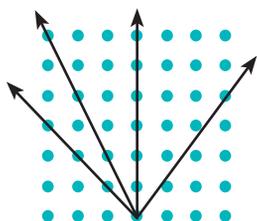


Рис. 34.4. В результате упорядоченного строения кристалла расстояния между его частицами в разных направлениях — разные

От направления, выбранного в кристалле, зависят его теплопроводность, электропроводность, прозрачность, линейное расширение и многие другие физические свойства. Анизотропия кристаллов обусловлена их кристаллической решеткой: в разных направлениях расстояния между частицами, образующими кристаллическую решетку, разные (рис. 34.4).

**?** В каком направлении прочность графита наименьшая (см. рис. 34.2, б)?

Большие монокристаллы встречаются редко. Чаще всего кристаллические твердые тела являются *поликристаллическими*.

**Поликристаллические вещества** — это вещества, состоящие из множества сросшихся хаотично ориентированных кристалликов (кристаллитов).

В отличие от монокристаллов *поликристаллические тела изотропны*, то есть их свойства одинаковы во всех направлениях. Поликристаллическое строение твердого тела легко увидеть с помощью микроскопа. Большинство металлов, используемых человеком, — поликристаллические.

Например, в производстве искусственных алмазов используют полиморфный переход графита в алмаз. Этот переход происходит при давлениях 60 тыс. — 100 тыс. атмосфер и при температурах 1800–2300 °С. И наоборот: в результате нагревания в вакууме до температуры около 1500 °С алмаз превращается в графит.

### 3 Почему монокристаллы анизотропны

Кристаллические тела могут быть *монокристаллами* и *поликристаллами*.

**Монокристалл** — твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку.

Упорядоченное расположение частиц в монокристалле является причиной того, что монокристаллы имеют плоские грани и постоянные углы между гранями (рис. 34.3); *физические свойства монокристаллов зависят от выбранного в них направления*.

Зависимость физических свойств кристалла от выбранного в нем направления называют **анизотропией** (от греч. *anisos* — неравный и *tropos* — направление, свойство).

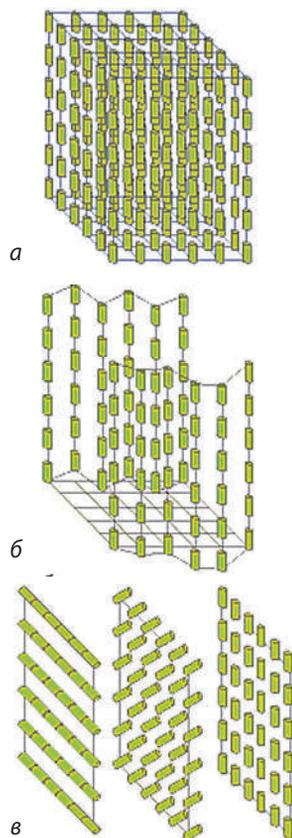
Так, механическая прочность многих кристаллов различна в разных направлениях: кусок слюды легко расслаивается на тонкие пластины в одном направлении, но его намного сложнее разломать перпендикулярно пластинам.

#### 4 Жидкие кристаллы

**Жидкий кристалл** — состояние вещества, сочетающее текучесть жидкости и анизотропию кристаллов.

В жидкости частицы в целом расположены хаотически и могут свободно вращаться и перемещаться в любых направлениях; в кристаллическом твердом теле существует трехмерный дальний порядок и частицы могут только колебаться около положений равновесия. В жидком кристалле имеется определенная упорядоченность в расположении молекул (рис. 34.5), однако допускается и некоторая свобода их перемещения. Наиболее часто жидкокристаллическое состояние наблюдается у органических веществ, молекулы которых имеют удлиненную или дискообразную форму.

Зависимость оптических свойств жидких кристаллов от температуры и электрического поля обеспечила их широкое применение в дисплеях часов и калькуляторов, в персональных компьютерах, плоских телевизионных экранах; их используют в медицине (например, как индикаторы температуры) и пр. Так, угол поворота осей молекул в каждом слое холестерического жидкого кристалла зависит от температуры, а от угла поворота зависит окраска кристалла, поэтому если тонкую полимерную пленку с микрополостями, заполненными холестериком, наложить на тело, то получится цветное отображение распределения температуры.



**Рис. 34.5.** Некоторые типы жидких кристаллов: а — *сметтические* (молекулы ориентированы параллельно друг другу и образуют тонкие слои); б — *нематические* (нитевидные молекулы направлены параллельно друг другу, но могут скользить вверх и вниз); в — *холестерические* (плоские длинные молекулы собраны в слои, повернутые относительно друг друга)

#### Контрольные вопросы

1. Почему аморфные тела изотропны? 2. Какие свойства характерны для монокристаллов? 3. Что такое анизотропия? Приведите примеры ее проявления. 4. Все ли кристаллические тела анизотропны? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ. 5. Что такое полиморфизм? Приведите примеры. 6. В чем особенности строения и свойств жидких кристаллов? Где их применяют?

#### Упражнение № 34

1. Кварцевый шарик после нагревания приобрел форму эллипсоида. Почему?  
2. Каждую из двух тонких пластин, изготовленных из разных веществ, сверху покрыли слоем воска. Снизу к каждой пластине прижали острие раскаленной иглы (рис. 1, а) — на небольшом участке вокруг острия воск растаял. По форме участков (рис. 1, б, в) определите, какая пластина изготовлена из поликристаллического вещества, а какая является монокристаллом. Ответ обоснуйте.

3. В современных смартфонах используют два типа LCD (liquid crystal display) — жидкокристаллических дисплеев (рис. 2). Смартфоны с дисплеем TFT LCD стоят меньше, однако потребители часто предпочитают смартфоны с дисплеем IPS LCD. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, попробуйте объяснить почему.

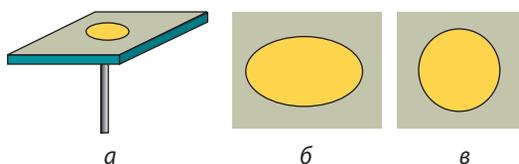


Рис. 1



Рис. 2

4. «Полимеры — материалы будущего». Подготовьте краткое сообщение о структуре полимеров и их применении в одной из областей: промышленность, сельское хозяйство, медицина, быт и т. п. Какие природные материалы сберегают, заменяя их полимерами?

### Физика и техника в Украине



**Институт монокристаллов НАН Украины** (Харьков) имеет более чем полувековую историю и является одним из признанных лидеров в следующих областях:

- ♦ фундаментальные исследования структуры, физических и физико-химических свойств кристаллов, тонких пленок, наноматериалов;
- ♦ разработка и совершенствование высокотехнологичного оборудования и методов производства кристаллов различного функционального назначения.

Исследования и разработки института широко востребованы в мире — об этом свидетельствуют его многочисленные научные и производственные связи, участие в крупных международных научных экспериментах, расширение внешнеэкономической деятельности на основе созданных высоких технологий. Характерная особенность института — законченный цикл научных разработок от идей и исследований до создания материалов и их внедрения в производство.

## § 35. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

— *Нужен совет! Прогнула балка межэтажного перекрытия...*

— *Вам, пожалуй, не советы и подсказки надо искать, а нормального техника-строителя, и срочно...* (Из разговора в Интернете)

*Девушка пострадала, сорвавшись со жгута банджи-джампинга. Работа аттракциона приостановлена.* (Из новостей)

Разумеется, мы можем жить в доме, не имея представления о материалах, из которых он построен; можем прыгать с моста или самолета, не представляя, какова прочность жгута или строп парашюта. Но невозможно построить надежный дом, создать безопасный аттракцион без знаний механических свойств используемых материалов. О некоторых из таких свойств пойдет речь в данном параграфе.

### 1 Какие существуют виды деформации

Напомним: **деформация** — это изменение формы и (или) размеров тела. Если после прекращения действия внешних сил тело полностью восстановило свои форму и размеры, то оно испытало *упругую деформацию*; если форма и размеры не восстановились, тело подверглось *пластической деформации*.

Когда тело деформируется, отдельные его части смещаются друг относительно друга. По характеру смещения частей различают *деформации растяжения (сжатия), изгиба, сдвига, кручения* (см. таблицу).

Виды деформаций	
	<p>Силы, приложенные к телу, пытаются вытянуть или сжать тело, вследствие чего расстояние между слоями молекул увеличивается (<i>деформация растяжения</i>) или уменьшается (<i>деформация сжатия</i>).</p>
	<p>Силы, приложенные к телу, пытаются искривить (выгнуть) тело. <i>Деформация изгиба</i> — это одновременно деформация растяжения и деформации сжатия: выпуклая часть тела подвергается деформации растяжения (расстояние между слоями молекул увеличивается); вогнутая часть — деформации сжатия (расстояние между слоями молекул уменьшается).</p>
	<p>Силы, приложенные к телу, направлены противоположно друг другу и сдвигают слои тела друг относительно друга. <i>Деформацию сдвига</i> испытывают, например, гвозди и болты, скрепляющие части различных конструкций; ткань, которую разрезают ножницами. Сдвиг на большие углы <math>\alpha</math> может привести к разрушению тела — <i>срезу</i>.</p>
	<p>Силы, приложенные к телу, создают вращательный момент относительно продольной оси тела. Смещение слоев молекул происходит неодинаково — каждый слой поворачивается на определенный угол относительно другого слоя. <i>Деформацию кручения</i> испытывают валы всех машин, винты, ключи, отвертки и т. д.</p>

? Какие деформации испытывают тела на рис. 35.1? Обоснуйте свой ответ.



Рис. 35.1. К вопросу в § 35

### Изменится ли прочность



Когда стержень подвергается деформации изгиба, его средняя часть (часть около оси) не испытывает ни растяжения, ни сжатия. То есть, если ее удалить, то прочность конструкции на изгиб почти не изменится.

Поэтому, например, раму велосипеда, которая преимущественно подвергается деформации изгиба, изготавливают из тонких полых металлических трубок, благодаря чему велосипед достаточно легкий и остается при этом прочным.

О подобной прочности «конструкций», легкости и экономии «материала» позаботилась и природа — она наделила человека и животных трубчатыми костями конечностей, а злаки — трубчатыми стеблями.



## 2 Что такое механическое напряжение

Когда тело деформируется, его состояние изменяется: в любом сечении тела возникают силы упругости, препятствующие разрушению; чем больше деформация, тем больше силы упругости. Состояние деформированного тела характеризуется *механическим напряжением*.

**Механическое напряжение  $\sigma$**  — физическая величина, которая характеризует деформированное тело и равна отношению модуля силы упругости  $F_{\text{упр}}$  к площади  $S$  поперечного сечения тела<sup>\*\*</sup>:

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$$

*Единица механического напряжения в СИ — паскаль:  $[\sigma] = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$  ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ).*

Установлено, что механическое напряжение зависит от *относительного удлинения тела*.

**Относительное удлинение  $\varepsilon$  тела** — физическая величина, равная отношению удлинения  $\Delta l$  к исходной длине  $l_0$  тела:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ или в процентах: } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

## 3 Анализируем диаграмму напряжений

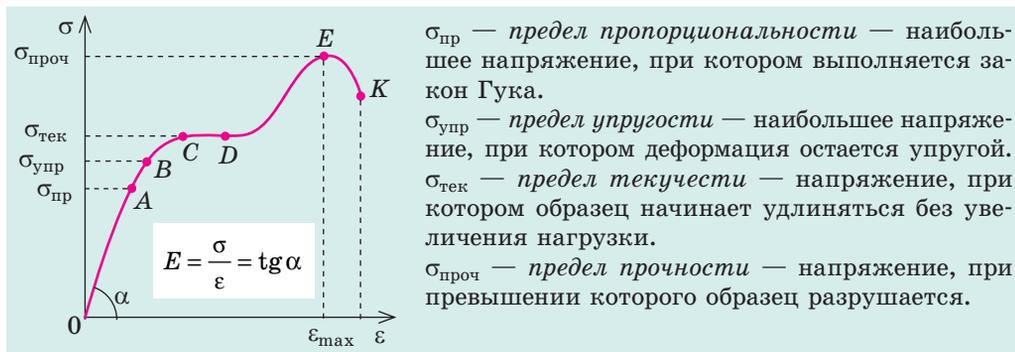
Зависимость механического напряжения от относительного удлинения устанавливается экспериментально. Образец растягивают с помощью специальной машины, постепенно увеличивая нагрузку, и строят *диаграмму напряжений* — график зависимости механического напряжения от относительного удлинения образца (рис. 35.2). Опыты показывают, что при небольших деформациях (участок *OA* графика) справедлив **закон Гука**:

При малых упругих деформациях растяжения и сжатия механическое напряжение  $\sigma$  прямо пропорционально относительному удлинению  $\varepsilon$ :

$$\sigma = E |\varepsilon|^{**}$$

\* Далее будем рассматривать только тела, которые имеют одинаковую для данного тела площадь поперечного сечения (шнуры, стержни, тросы и т. п.).

\*\* Относительное удлинение  $\varepsilon$  взято по модулю, так как закон Гука справедлив как для деформации растяжения ( $\varepsilon > 0$ ), так и для деформации сжатия ( $\varepsilon < 0$ ).



**Рис. 35.2.** Диаграмма напряжений: *OAB* — участок упругих деформаций; *BC* — участок пластических деформаций; *CD* — участок текучести материала; *EK* — разрушение образца

Коэффициент пропорциональности *E* называют *модулем Юнга* или *модулем упругости*. Модуль Юнга характеризует упругие свойства материала, его определяют по диаграмме напряжений (см. рис. 35.2) и фиксируют в таблицах.

*Единица модуля Юнга в СИ — паскаль:*  
 $[E] = 1 \text{ Па (Pa)}$ .

**?** Воспользовавшись определениями механического напряжения  $\sigma$  и относительного удлинения  $\epsilon$ , приведите закон Гука, представленный в виде  $\sigma = E|\epsilon|$ , к виду  $F_{\text{упр}} = k|\Delta l|$ . Докажите, что жесткость *k* стержня определяется по формуле  $k = E \frac{S}{l_0}$ .

Вернемся к рис. 35.2. Как только нагрузка станет такой, что механическое напряжение в образце достигнет *предела пропорциональности*  $\sigma_{\text{пр}}$ , зависимость  $\sigma(\epsilon)$  становится нелинейной (участок *AB* графика), однако если снять нагрузку, то образец восстановит свои форму и размеры, то есть участок *OAB* диаграммы напряжений — это участок *упругих деформаций*.

Если увеличивать нагрузку дальше, деформация начинает быстро возрастать и становится пластической (участок *BC*), а после достижения *предела текучести*  $\sigma_{\text{тек}}$  образец некоторое время удлиняется даже без увеличения нагрузки (участок *CD*). Если нагрузку снова увеличить, образец еще немного удлинится (участок *DE*), напряжение в нем достигнет *предела прочности*  $\sigma_{\text{проч}}$ , после чего образец разорвется.

#### 4 Упругость, пластичность, хрупкость

Согнем стальную линейку, а затем отпустим ее — линейка полностью восстановит свою форму. А вот свинцовая пластинка так и останется согнутой. Если же попробовать согнуть пластинку из стекла, то стекло сломается даже при незначительной деформации. В зависимости от «реакции» материала на деформацию различают *упругие, пластические, хрупкие материалы*.

*Модули Юнга для некоторых материалов*

Материал	Модуль Юнга $E, \times 10^9 \text{ Па}$
Алюминий	63–70
Бетон	15–40
Каучук	$7,9 \cdot 10^{-3}$
Медь (литье)	82
Серебро	82,7
Стекло	49–78
Чугун ковкий	150

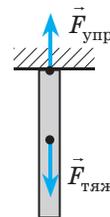
Упругие материалы	Пластические материалы	Хрупкие материалы
<p>Материалы, проявляющие упругие свойства при сравнительно больших деформациях или достаточно длительном воздействии</p> 	<p>Материалы, в которых упругая деформация переходит в пластическую при незначительных деформациях</p> 	<p>Материалы, которые разрушаются при очень малых деформациях и почти не проявляют пластических свойств</p> 

Деление материалов на упругие, пластические и хрупкие условно, ведь свойства материалов существенно зависят от влажности, температуры, скорости увеличения нагрузки и т. п. Так, свинец, являющийся пластическим при нормальных условиях, становится упругим при температуре  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , упругая резина при низких температурах становится хрупкой. Глина является хрупкой в сухом состоянии и пластической — во влажном. Битум при медленном увеличении нагрузки обнаруживает пластические свойства, а при быстром увеличении нагрузки становится хрупким.

### 5 Учимся решать задачи

**Задача.** С вертолета, зависшего на некоторой высоте, спускают стальной трос. Какой может быть максимальная длина троса, чтобы он не оборвался под собственным весом? Предел прочности стали —  $320\text{ МПа}$ .

*Анализ физической проблемы.* Выполним пояснительный рисунок. Сила упругости в любом сечении троса уравнивает силу тяжести, которая действует на часть троса, расположенную ниже этого сечения. Очевидно, что при отсутствии дефектов трос разорвется в самом верхнем сечении.



Дано:

$$\sigma_{\max} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$$

$l$  — ?

Решение

Трос находится в состоянии покоя, поэтому  $F_{\text{тяж}} = F_{\text{упр}}$ .

$$F_{\text{тяж}} = mg,$$

где  $m = \rho V$ , а  $V = Sl$ ,  
потому  $F_{\text{тяж}} = \rho Slg$ .

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S} \text{ —}$$

по определению,  
потому  $F_{\text{упр}} = \sigma S$ .

$$\text{Итак, имеем: } \rho Slg = \sigma S \Rightarrow l = \frac{\sigma}{\rho g}.$$

Плотность стали найдем в таблице плотностей.

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[l] = \frac{\text{Па}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; \quad l = \frac{3,2 \cdot 10^8}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 10} \approx 4,1 \cdot 10^3 \text{ (м)}.$$

*Анализ результата.* Наибольшая возможная длина троса —  $4,1\text{ км}$ . Поскольку реальные тросы имеют в десятки и сотни раз меньшую длину, они не смогут оборваться под действием собственного веса.

Ответ:  $l = 4,1\text{ км}$ .



### Подводим итоги

• Деформация — изменение формы и (или) размеров тела. Деформация упругая, если после прекращения действия внешних сил тело восстанавливает свои форму и размеры; деформация пластическая, если форма и размеры тела не восстанавливаются. Различают также деформации сжатия (растяжения), сдвига, изгиба, кручения.

• Физическую величину, которая характеризует деформированное тело и равна отношению модуля силы упругости  $F_{\text{упр}}$  к площади  $S$  поперечного сечения тела, называют механическим напряжением  $\sigma$ :  $\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$ .

• Закон Гука: для малых упругих деформаций растяжения и сжатия механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению  $\varepsilon$ :  $\sigma = E\varepsilon$ , где  $E$  — модуль Юнга (модуль упругости), который характеризует упругие свойства вещества. Наибольшее напряжение, при котором выполняется закон Гука, называют пределом пропорциональности  $\sigma_{\text{пр}}$ .



### Контрольные вопросы

1. Что такое деформация? 2. Назовите виды деформации. При каких условиях они возникают? Приведите примеры. 3. Дайте характеристику механического напряжения как физической величины. 4. Представьте две формулировки закона Гука. При каких условиях выполняется этот закон? 5. Что характеризует модуль Юнга? Какова его единица в СИ? 6. В чем заключается явление текучести материала? 7. Что такое предел прочности? Чем упругие материалы отличаются от пластических? от хрупких?



### Упражнение № 35

- Почему трубы, из которых изготавливают рангоут парусника, полые?
- Подумайте, какие деформации испытывают следующие части парусника (см. рис. 1): корпус; мачты; доски палубы; тросы такелажа; якорная цепь; канат для швартовки; вал брашпиля (колесоворот для поднятия якоря).
- К резиновому шнуру длиной 10 см и диаметром 2 мм подвесили груз массой 31,4 г. Длина шнура увеличилась на 1 см. Определите: 1) механическое напряжение в шнуре; 2) относительное удлинение шнура; 3) модуль Юнга для резины, из которой изготовлен шнур; 4) наименьший диаметр шнура, при котором деформация останется упругой (предел упругости для резины —  $5 \cdot 10^6$  Па).
- Определите силу удара при штамповке медной монеты радиусом 1 см, если предел текучести для меди 70 МПа (рис. 2).
- Какая диаграмма на рис. 3 построена для упругого материала? пластического материала? хрупкого материала?
- Представьте, что вы решили построить дом. Какие материалы (упругие, пластические, хрупкие, с каким пределом прочности и пр.) вы будете использовать для фундамента; стен; потолка; пола; балок. Почему?



Рис. 1



Рис. 2

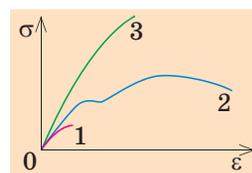


Рис. 3



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

**Тема.** Исследование изотермического процесса.

**Цель:** исследовав несколько термодинамических состояний газа при одинаковой температуре, экспериментально проверить закон Бойля — Мариотта.

**Оборудование:** запаянная с одного конца стеклянная трубка, высокий стеклянный сосуд, заполненный водой, барометр-анероид (один на класс), штатив с муфтой и кольцом, линейка.

## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

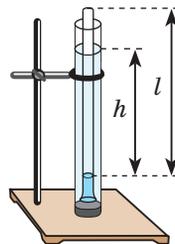
**Подготовка к эксперименту**

Соберите устройство (см. рисунок); в сосуд опустите трубку открытым концом вниз на максимальную глубину.

**Эксперимент**

Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.

1. Измерьте барометром атмосферное давление  $p_{\text{атм}}$ , результат представьте в килопаскалях.
2. Измерьте высоту  $l$  столба воздуха в трубке.  
*Обратите внимание:* площадь поперечного сечения трубки неизменна, поэтому объем  $V$  воздуха в трубке прямо пропорционален высоте  $l$  его столба:  $V \sim l$ . То есть для проверки закона Бойля — Мариотта достаточно доказать, что  $pl = \text{const}$  при любой глубине погружения трубки.
3. Определите давление воздуха в трубке. Для этого:
  - 1) измерьте разницу уровней воды в сосуде и трубке ( $h$ );
  - 2) вычислите и представьте в килопаскалях гидростатическое давление столба воды высотой  $h$ :  $p_{\text{гидр}} = \rho gh$ , где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;
  - 3) вычислите давление  $p$  воздуха в трубке:  $p = p_{\text{атм}} + p_{\text{гидр}}$ .
4. Повторите опыт еще два раза, каждый раз уменьшая глубину погружения.



Номер опыта	Атмосферное давление $p_{\text{атм}}$ , кПа	Высота столба воздуха $l$ , м	Разница уровней воды $h$ , м	Гидростатическое давление $p_{\text{гидр}}$ , кПа	Давление воздуха $p$ , кПа	Произведение $C = pl$ , кПа·м

**Обработка результатов эксперимента**

1. Для каждого термодинамического состояния воздуха в трубке вычислите произведение давления и высоты столба воздуха:  $C = pl$ .
2. Оцените относительную погрешность эксперимента:  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{C_1}{C_3} \right| \cdot 100\%$ .

**Анализ эксперимента и его результатов**

По результатам эксперимента сделайте вывод, в котором укажите: 1) закон, который вы экспериментально проверяли; 2) величины, которые измеряли; 3) результат проверки; 4) причины погрешности; 5) величину, измерение которой дает наибольшую погрешность.

**Творческое задание**

Изменяются ли результаты эксперимента, если для его проведения использовать трубку с большей или меньшей площадью поперечного сечения? Если изменятся, то как и почему? Выполните экспериментальную проверку своего предположения.

**Тема.** Измерение поверхностного натяжения жидкости.

**Цель:** измерить поверхностное натяжение воды методом отрыва капель.

**Оборудование:** штангенциркуль, медицинский шприц объемом 2 мл без иглы, зубочистка, стакан с дистиллированной водой.

## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

### Теоретические сведения

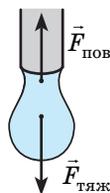
При медленном вытекании жидкости из тонкой вертикальной трубки на конце трубки образуется капля (см. рисунок). Отрыв капли происходит в тот момент, когда сила тяжести становится равной силе поверхностного натяжения, действующей на каплю вдоль окружности шейки капли:

$$F_{\text{пов}} = F_{\text{тяж}}, \text{ или } m_0 g = \sigma l,$$

где  $m_0$  — масса капли;  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $l = \pi d$  — длина окружности ( $d$  — внутренний диаметр трубки).

Массу капли можно найти по формуле:  $m_0 = \rho V_0 = \frac{\rho V}{N}$ , где  $\rho$  — плотность жидкости;  $V$  — объем вытекшей жидкости;  $N$  — количество капель.

Таким образом, измерив внутренний диаметр трубки  $d$  и посчитав количество  $N$  капель, образовавшихся при вытекании жидкости объемом  $V$ , можно вычислить поверхностное натяжение жидкости:  $\sigma = \frac{\rho V g}{N \pi d}$ .



### Эксперимент

*Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.*

1. Измерьте диаметр выходного отверстия шприца.
2. Наберите в шприц 2 мл воды. Медленно нажимая на поршень и считая капли, выкапайте воду в стакан.
3. Повторите опыт еще 3–4 раза.

Номер опыта	Диаметр отверстия $d, \times 10^{-3} \text{ м}$	Объем воды $V, \times 10^{-6} \text{ м}^3$	Количество капель		Поверхностное натяжение $\sigma_{\text{ср}}, \times 10^{-3} \text{ Н/м}$
			$N$	$N_{\text{ср}}$	

### Обработка результатов эксперимента

1. По результатам опытов найдите среднее количество капель  $N_{\text{ср}}$ .
2. Рассчитайте среднее значение поверхностного натяжения воды  $\sigma_{\text{ср}}$ .
3. Оцените относительную погрешность эксперимента, сравнив полученное значение поверхностного натяжения воды с табличным.

### Анализ эксперимента и его результатов

По результатам эксперимента сделайте вывод, в котором укажите: 1) величину, которую вы измеряли; 2) полученный результат; 3) причины погрешности; 5) считаете ли вы предложенный способ удобным.

### Творческое задание

Предложите эксперимент по выявлению зависимости поверхностного натяжения жидкости от температуры жидкости и от наличия в жидкости примесей. Проведите эксперименты, сделайте выводы.

# ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА III «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА» Часть 1. Молекулярная физика

1. Вы вспомнили *основные положения МКТ* и их экспериментальное обоснование.

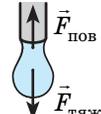
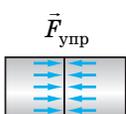
## Основные положения молекулярно-кинетической теории

<p>Все вещества состоят из частиц — атомов, молекул, ионов</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>♦ 1 моль вещества содержит <math>N_A = 6,02 \cdot 10^{23}</math> частиц.</li> <li>♦ Масса частицы: <math>m_0 = \frac{M}{N_A}</math>, где <math>M</math> — молярная масса.</li> <li>♦ Количество молекул: <math>N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A</math>, где <math>\nu</math> — число молей (количество вещества)</li> </ul>	<p>Частицы непрерывно хаотически движутся</p> <p>Средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул: <math>\bar{v}_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}</math>, где <math>T</math> — абсолютная температура: <math>T = t + 273</math> (К); <math>R = 8,31</math> Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная</p>	<p>Частицы взаимодействуют друг с другом:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>♦ <i>притягиваются</i> на расстояниях, которые больше размера частиц;</li> <li>♦ <i>отталкиваются</i> на расстояниях, которые меньше размера частиц</li> </ul>
--	--	---

2. Вы узнали о физической модели «идеальный газ» и о законах, связывающих макроскопические и микроскопические параметры этого газа.

<p><b>Основное уравнение МКТ идеального газа</b></p> $p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2 \leftarrow p = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2 \rightarrow p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$	<p>Связь средней кинетической энергии поступательного движения молекул и температуры;</p> $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$	
$p = nkT$	$p = nkT$	
<p>Уравнение Менделеева — Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)</p> $pV = \frac{m}{M} RT$	<p><math>p</math> — давление газа; <math>V</math> — объем газа; <math>n = \frac{N}{V}</math> — концентрация молекул газа;</p> <p><math>k = 1,38 \cdot 10^{-23}</math> Дж/К — постоянная Больцмана</p>	
<p>Уравнение Клапейрона</p> $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$		
<p>Изотермический процесс <math>T_1 = T_2</math></p> <p>Закон Бойля — Мариотта: <math>p_1 V_1 = p_2 V_2</math></p>	<p>Изобарный процесс <math>p_1 = p_2</math></p> <p>Закон Гей-Люссака: <math>\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}</math></p>	<p>Изохорный процесс <math>V_1 = V_2</math></p> <p>Закон Шарля: <math>\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}</math></p>

3. Вы узнали, какие *физические величины* характеризуют *влажность воздуха*; *поверхностный слой жидкости*; *состояние деформированного тела*.

<p>Влажность воздуха</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="padding: 5px;"> <p>абсолютная</p> <math display="block">\rho_a = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{V}</math> </td> <td style="padding: 5px;"> <p>относительная</p> <math display="block">\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}}</math> </td> </tr> </table>	<p>абсолютная</p> $\rho_a = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{V}$	<p>относительная</p> $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}}$	<p>Поверхностное натяжение</p> $\sigma = \frac{W_{пов}}{S} = \frac{F_{пов}}{l}$ 	<p>Механическое напряжение</p> $\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$ 
<p>абсолютная</p> $\rho_a = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{V}$	<p>относительная</p> $\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}}$			

4. Вы узнали, при каких условиях жидкость смачивает либо не смачивает твердую поверхность, и получили формулу для расчета высоты  $h$  поднятия (опускания) жидкости в капилляре радиусом  $r$ :  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ .

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ III «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА».

### Часть 1. Молекулярная физика

*Задания 1–5 содержат только один правильный ответ.*

1. (1 балл) При нормальном атмосферном давлении температура кипения воды по шкале Кельвина равна...  
а) 0 К;                      б) 100 К;                      в) 273 К;                      г) 373 К.
2. (1 балл) Какой деформации подвергается ткань, которую разрезают ножницами?  
а) сжатия;                      б) изгиба;                      в) кручения;                      г) сдвига.
3. (1 балл) Имеется 2 моль водорода, 2 моль кислорода и 2 моль водяного пара. Какой газ содержит большее количество молекул?  
а) водород;                      в) водяной пар;  
б) кислород;                      г) количество молекул одинаково.
4. (1 балл) Когда показания сухого и влажного термометров психрометра совпадают, это означает, что относительная влажность воздуха равна...  
а) 100 %;                      б) 50 %;                      в) 10 %;                      г) 0 %.
5. (2 балла) На рис. 1 изображены графики процессов изменения состояния идеального газа. Какой график соответствует изобарному охлаждению газа?  
а) 1;                      б) 2;                      в) 3;                      г) 4.
6. (4 балла) Установите соответствие между физическими явлениями и законами, которые их описывают.

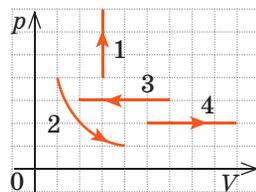


Рис. 1

- 1 Пузырек воздуха, поднимаясь из глубины равномерно прогретого водоема, увеличивается в объеме
- 2 Железная иголка лежит на поверхности воды
- 3 Герметично закрытый баллон с газом, нагреваемый на солнце, может взорваться
- 4 Объем, занимаемый 1 моль идеального газа, при одинаковых условиях не зависит от вида газа

- А  $F_{\text{упр}} = \sigma S$
- Б  $pV = \nu RT$
- В  $p_1 V_1 = p_2 V_2$
- Г  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
- Д  $mg = \sigma l + F_{\text{арх}}$

7. (3 балла) Сколько молекул газа содержится в сосуде емкостью 1,0 л при давлении  $1,2 \cdot 10^5$  Па и температуре 30 °С?
8. (3 балла) На рис. 2 изображен график процесса, происходящего с идеальным газом. Как в ходе этого процесса изменяются давление, объем и температура газа?
9. (4 балла) Днем температура воздуха равна 28 °С, относительная влажность — 60 %. Выпадет ли ночью роса, если температура воздуха снизится до 20 °С?
10. (4 балла) Вода в капилляре поднялась на высоту 2,4 см. Определите диаметр капилляра. На сколько изменится высота подъема жидкости в капилляре, если взять капилляр в два раза большего радиуса? воспользоваться вместо воды спиртом? перенести опыт на Марс? считайте, что  $g_3 \approx 10$  м/с<sup>2</sup>,  $g_M \approx 4$  м/с<sup>2</sup>.

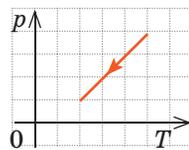


Рис. 2

*Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, выполненные правильно, подсчитайте сумму баллов. Разделите эту сумму на два. Полученное число соответствует уровню ваших учебных достижений.*



Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой вы найдете на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».

## ЧАСТЬ 2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ



### § 36. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

МКТ стала общепризнанной на рубеже XIX и XX веков. Задолго до ее создания исследованием тепловых процессов занималась *термодинамика* — раздел физики, изучающий превращение *внутренней (тепловой) энергии* в другие виды энергии и наоборот, а также количественные соотношения при таких превращениях. О внутренней энергии и процессах, в результате которых она изменяется, вы узнаете из этого параграфа.

1

#### Внутренняя энергия и ее особенности

Внутренняя энергия макроскопического тела определяется характером движения и взаимодействия всех микрочастиц, из которых состоит тело (система тел). Таким образом, к внутренней энергии следует отнести:

- кинетическую энергию хаотического (теплого) движения частиц вещества (атомов, молекул, ионов);
- потенциальную энергию взаимодействия частиц вещества;
- энергию взаимодействия атомов в молекулах (химическую энергию);
- энергию взаимодействия электронов и ядра в атоме и энергию взаимодействия нуклонов в ядре (внутриатомную и внутриядерную энергии).

Однако для описания тепловых процессов важно не столько значение *внутренней энергии*, как ее изменение. При тепловых процессах химическая, внутриатомная и внутриядерная энергии практически не изменяются. Именно поэтому **внутренняя энергия в термодинамике определяется как сумма кинетических энергий хаотического (теплого) движения частиц вещества (атомов, молекул, ионов), из которых состоит тело, и потенциальных энергий их взаимодействия.**

Внутреннюю энергию обозначают символом  $U$ .

Единица внутренней энергии в СИ — **джоуль**:  $[U] = 1 \text{ Дж (J)}$ .

#### Особенности внутренней энергии идеального газа

1. Атомы и молекулы идеального газа практически не взаимодействуют друг с другом, поэтому *внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии поступательного и вращательного движений его частиц.*

2. *Внутренняя энергия данной массы идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.* Докажем данное утверждение для одноатомного газа. Атомы такого газа движутся только поступательно, поэтому, чтобы определить его внутреннюю энергию, следует среднюю кинетическую энергию поступательного движения атомов умножить на количество атомов:

$U = \bar{E}_k \cdot N = \frac{3}{2} kT \cdot \frac{m}{M} N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{M} kN_A T$ . Итак, для одноатомного идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

Используя уравнение состояния  $pV = \frac{m}{M} RT$ , выражение для внутренней энергии идеального одноатомного газа можно представить так:  $U = \frac{3}{2} pV$ .

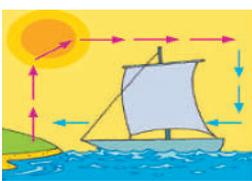
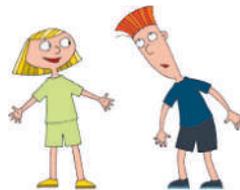
3. *Внутренняя энергия — функция состояния системы*, то есть она однозначно определяется основными макроскопическими параметрами ( $p, V, T$ ), характеризующими систему. Независимо от того, каким образом система переведена из одного состояния в другое, изменение внутренней энергии будет одинаковым.

4. *Внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: совершением работы и теплопередачей.*

## 2 Какие существуют виды теплопередачи

**Теплопередача (теплообмен)** — процесс изменения внутренней энергии тела или частей тела без совершения работы.

Процесс теплопередачи возможен только при наличии разности температур. *Самопроизвольно тепло всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому.* Чем больше разность температур, тем быстрее — при прочих равных условиях — протекает процесс передачи тепла.

Виды теплопередачи		
Теплопроводность	Конвекция	Излучение
<p><i>Вид теплопередачи, который обусловлен хаотическим движением частиц вещества и не сопровождается переносом этого вещества.</i> Лучшие проводники тепла — металлы, плохо проводят тепло дерево, стекло, кожа, жидкости (за исключением жидких металлов); самые плохие проводники тепла — газы. Передача энергии от горячей воды к батарее отопления, от поверхности воды до ее нижних слоев и т. д. происходит благодаря теплопроводности.</p> 	<p><i>Вид теплопередачи, при котором тепло переносится потоками жидкости или газа.</i> Теплые потоки жидкости или газа имеют меньшую плотность, поэтому под действием архимедовой силы поднимаются, а холодные потоки — опускаются. Благодаря конвекции происходит циркуляция воздуха в помещении, нагревается жидкость в стоящей на плите кастрюле, существуют ветры и морские течения и т. д. В твердых телах конвекция невозможна.</p> 	<p><i>Вид теплопередачи, при котором энергия передается посредством электромагнитных волн.</i> Излучение — универсальный вид теплопередачи: тела всегда излучают и поглощают инфракрасное (тепловое) излучение. Это <i>единственный вид теплообмена, возможный в вакууме</i> (энергия от Солнца передается только излучением). <i>Лучше излучают и поглощают энергию тела с темной поверхностью.</i></p> 
<p><b>?</b> Почему сковороду изготавливают из металла, а ее ручку — из дерева? Почему днем ветер дует с моря, а ночью — с суши? Почему в жару надевают светлую одежду?</p>		

### 3 Как определить количество теплоты

**Количество теплоты  $Q$**  — это физическая величина, равная энергии, которую тело получает (или отдает) в ходе теплопередачи.

*Единица количества теплоты в СИ — джоуль:  $[Q] = 1 \text{ Дж (J)}$ .*

Из курса физики 8 класса вы знаете, что *количество теплоты, которое поглощается при нагревании вещества (или выделяется при его охлаждении), вычисляют по формуле:  $Q = cm\Delta T = cm\Delta t$* , где  $c$  — удельная теплоемкость вещества;  $m$  — масса вещества;  $\Delta T = T - T_0 = t - t_0$  — изменение температуры.

*Обратите внимание!* Произведение удельной теплоемкости на массу вещества, из которого изготовлено тело, называют **теплоемкостью тела:  $C = cm$** . Если известна теплоемкость  $C$  тела, то количество теплоты, которое получает тело при изменении температуры на  $\Delta T$ , вычисляют по формуле:  **$Q = C\Delta T$** .

#### Расчет количества теплоты при фазовых переходах

Кристаллическое состояние ↔ Жидкое состояние	Жидкое состояние ↔ Газообразное состояние
Температуру, при которой происходят фазовые переходы «кристалл → жидкость» и «жидкость → кристалл», называют <i>температурой плавления</i> . Температура плавления зависит от рода вещества и внешнего давления. Количество теплоты $Q$ , которое поглощается при плавлении кристаллического вещества (или выделяется при кристаллизации жидкости), вычисляют по формуле: $Q = \lambda m,$ где $m$ — масса вещества; $\lambda$ — удельная теплота плавления.	Фазовые переходы «жидкость → пар» и «пар → жидкость» происходят при любой температуре. Количество теплоты $Q$ , которая поглощается при парообразовании (или выделяется при конденсации), вычисляют по формуле: $Q = rm \quad (Q = Lm),$ где $m$ — масса вещества; $r$ ( $L$ ) — удельная теплота парообразования при данной температуре (обычно в таблицах представлена удельная теплота парообразования при температуре кипения жидкости).
Напомним: и при плавлении, и при кипении <i>температура вещества не изменяется</i> .	

### 4 Учимся решать задачи

**Задача 1.** Неон массой 100 г находится в колбе объемом 5,0 л. В процессе изохорного охлаждения давление неона уменьшилось с 100 до 50 кПа. На сколько при этом изменились внутренняя энергия и температура неона?

Дано:

$$m = 0,10 \text{ кг}$$

$$V = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$p_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$\Delta U \text{ — ?}$$

$$\Delta T \text{ — ?}$$

*Анализ физической проблемы, решение.* Неон — одноатомный газ; для таких газов изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T,$$

$$\text{или } \Delta U = \frac{3}{2} p_2 V_2 - \frac{3}{2} p_1 V_1.$$

Поскольку охлаждение изохорное, объем неона не изменяется:  $V_1 = V_2 = V$ . После преобразований получим:

$$\Delta U = \frac{3}{2} V(p_2 - p_1); \quad \Delta T = \frac{2M\Delta U}{3mR}.$$

Проверим единицы, найдем значения искомым величин:

$$[\Delta U] = \text{м}^3 \cdot \text{Па} = \text{м}^3 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,5 \cdot 10^5) = -375 \text{ (Дж)};$$

$$[\Delta T] = \frac{\text{кг} / \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})} = \text{К}; \quad \Delta T = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot (-375)}{3 \cdot 0,1 \cdot 8,31} = -6 \text{ (К)}.$$

*Анализ результатов.* Знак «-» свидетельствует о том, что внутренняя энергия и температура неона уменьшились, — это соответствует изохорному охлаждению.

*Ответ:*  $\Delta U = -375$  Дж;  $\Delta T = -6$  К.

**Задача 2.** Внутренний алюминиевый сосуд калориметра имеет массу 50 г и содержит 200 г воды при температуре 30 °С. В сосуд бросили кубики льда при температуре 0 °С, в результате чего температура воды в калориметре снизилась до 20 °С. Определите массу льда. Удельные теплоемкости воды и алюминия:  $c_{\text{в}} = 4200$  Дж/(кг·К),  $c_{\text{Al}} = 920$  Дж/(кг·К); удельная теплота плавления льда — 334 кДж/кг.

*Анализ физической проблемы.* Калориметр имеет такое устройство, что теплообмен с окружающей средой практически отсутствует, поэтому для решения задачи воспользуемся уравнением теплового баланса. В теплообмене участвуют три тела: вода, внутренний сосуд калориметра, лед.

Дано:	Отдают энергию	Получает энергию
$m_{\text{Al}} = 0,05$ кг	вода + алюминий	лед
$m_{\text{в}} = 0,2$ кг	охлаждаются от 30 до 20 °С;	лед плавится + полученная вода нагревается от 0 до 20 °С;
$t_{\text{в}} = t_{\text{Al}} = 30$ °С	$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_1$ , $Q_{\text{Al}} = c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} \Delta t_1$ ;	$Q_{\text{л}} = \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} \Delta t_2$ ;
$t_{\text{л}} = 0$ °С	$ \Delta t_1  = 30$ °С - 20 °С = 10 °С = 10 К.	$\Delta t_2 = 20$ °С - 0 °С = 20 °С = 20 К.
$t = 20$ °С	Запишем уравнение теплового баланса:	
$c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_{\text{в}} m_{\text{в}}  \Delta t_1  + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}}  \Delta t_1  = \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} \Delta t_2$ .	
$c_{\text{Al}} = 920 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	После преобразований получим:	
$\lambda = 334 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$ \Delta t_1  (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}}) = m_{\text{л}} (\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2) \Rightarrow m_{\text{л}} = \frac{ \Delta t_1  (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}})}{\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2}$ .	
$m_{\text{л}} = ?$	Проверим единицу, найдем значение искомой величины:	
	$[m_{\text{л}}] = \left( \text{К} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \text{кг} \right) : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$	
	$m_{\text{л}} = \frac{10 \cdot (4200 \cdot 0,2 + 920 \cdot 0,05)}{334000 + 4200 \cdot 20} \approx 0,021 \text{ (кг)}.$	
	<i>Ответ:</i> $m_{\text{л}} = 21$ г.	



### Подводим итоги

• В термодинамике под внутренней энергией  $U$  тела понимают сумму кинетических энергий хаотического движения частиц вещества, из которых состоит тело, и потенциальных энергий их взаимодействия. Внутренняя энергия однозначно определяется основными макроскопическими параметрами ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ), характеризующими термодинамическую систему. Внутреннюю энергию идеального одноатомного газа определяют по формулам:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT; \quad U = \frac{3}{2} pV.$$

• Внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: совершением работы и теплопередачей. Существует три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение.

• Физическую величину, равную энергии, которую тело получает или отдает при теплопередаче, называют количеством теплоты ( $Q$ ):  $Q = cm\Delta T = C\Delta T$  — количество теплоты, которое поглощается при нагревании тела (или выделяется при его охлаждении);  $Q = \lambda m$  — количество теплоты, которое поглощается при плавлении вещества (или выделяется при кристаллизации);  $Q = rm$  ( $Q = Lm$ ) — количество теплоты, которое поглощается при парообразовании вещества (или выделяется при конденсации).



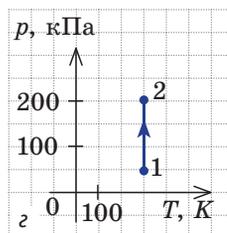
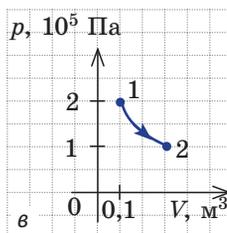
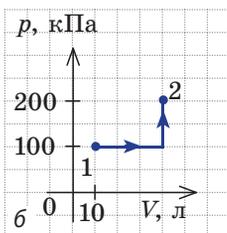
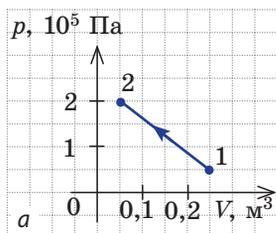
### Контрольные вопросы

1. Дайте определение внутренней энергии.
2. Выведите формулы для расчета внутренней энергии идеального одноатомного газа. Почему ими нельзя воспользоваться, если молекулы газа состоят из более чем одного атома?
3. Какие способы изменения внутренней энергии вы знаете?
4. Что такое теплопередача?
5. Какие существуют виды теплопередачи? Дайте их определения, приведите примеры.
6. Как рассчитать количество теплоты, переданное телу при нагревании (или выделенное им при охлаждении)?
7. Как вычислить количество теплоты, необходимое для плавления кристаллического вещества? для превращения жидкости в пар?



### Упражнение № 36

1. Аргон массой 300 г охлаждается от 200 до 50 °С. Определите изменение внутренней энергии аргона.
2. Объем неона массой 40 г при изобарном расширении увеличился от 12 до 15 л. Определите изменение внутренней энергии и изменение температуры неона, если его давление 50 кПа.
3. Идеальный одноатомный газ переходит из состояния 1 в состояние 2 (рис. а–г). Для каждого случая определите изменение внутренней энергии газа.



4. Железный брусок массой 600 г нагрели в кипящей воде и опустили в сосуд с водой при температуре 10 °С. В результате температура воды повысилась до 12 °С. Определите массу воды, если теплоемкость сосуда 100 Дж/К; удельная теплоемкость железа 460 Дж/(кг·К); удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг·К). Потерями энергии пренебречь.
5. В смесь, состоящую из 20 л воды и 1 кг льда, влили расплавленный свинец при температуре плавления (327 °С). В результате температура воды стала 100 °С, причем 100 г воды перешло в пар. Определите массу влитого свинца. Удельная теплоемкость свинца — 125 Дж/(кг·К), воды — 4200 Дж/(кг·К); удельная теплота плавления свинца — 21 кДж/кг, льда — 334 кДж/кг; удельная теплота парообразования воды — 2,3 МДж/кг.

## § 37. РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

В конце XVIII в. английский физик Бенджамин Томпсон (граф Румфорд) исследовал тепло, выделяющееся при сверлении бронзовых пушек. Румфорд успевал вскипятить поставленные на пушки котлы с водой за счет тепла, которое выделялось, пока лошади приводили в движение очень тупое сверло. В данном случае энергия механического движения сверла превращалась в энергию хаотического движения молекул бронзы и воды. А можно ли сделать наоборот?

### 1 Почему при изменении объема газа изменяется его внутренняя энергия

Внутренняя энергия газа может изменяться, если действующие на него внешние силы совершают работу (положительную или отрицательную). Например, если газ сжимают (газ совершает отрицательную работу) (рис. 37.1) и он при этом не отдает энергию окружающей среде, то скорость движения молекул газа, а соответственно, и внутренняя энергия, и температура газа увеличиваются. И наоборот: если газ расширяется (то есть совершает положительную работу), то скорость движения молекул, температура и внутренняя энергия газа уменьшаются.

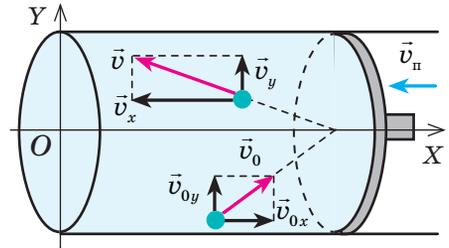


Рис. 37.1. При сжатии газа скорость его молекул после столкновения с поршнем увеличивается ( $v > v_0$ ) — газ нагревается. (Аналогично увеличивается скорость мяча после удара волейболиста, когда его рука движется навстречу мячу.)

### 2 Как вычислить работу газа

Вычислим работу, которую совершает сила давления газа при изменении его объема от  $V_1$  до  $V_2$ . По определению работы:

$$A = F s \cos \alpha.$$

Если газ расширяется изобарно, то сила, действующая со стороны газа на поршень, постоянна:  $F = pS$  ( $p$  — давление газа;  $S$  — площадь поршня); модуль перемещения поршня  $s = l_2 - l_1$  (рис. 37.2, а);  $\alpha = 0$ .

Таким образом, работа газа при его изобарном расширении равна:

$$A = F s \cos \alpha = pS(l_2 - l_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

Докажите, что при изобарном сжатии (рис. 37.2, б) работа газа отрицательна и тоже вычисляется по формуле  $A = p\Delta V$ , причем  $\Delta V < 0$ .

Работе газа при изобарном расширении (или сжатии) можно дать простое геометрическое толкование: работа газа численно равна площади прямоугольника под графиком зависимости  $p(V)$  (рис. 37.3).

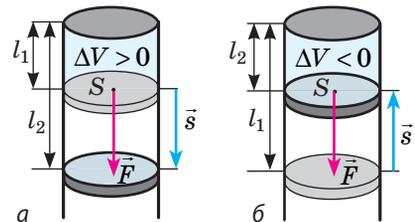


Рис. 37.2. К выводу формулы работы газа: а — газ расширяется; б — газ сжимается.  $\vec{F}$  — сила давления газа;  $\vec{s}$  — перемещение поршня

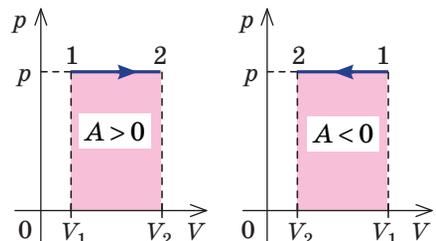
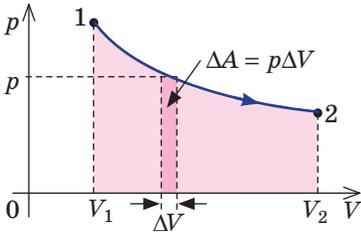
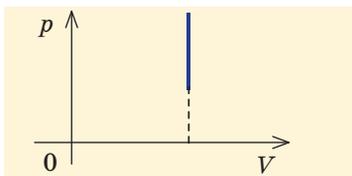


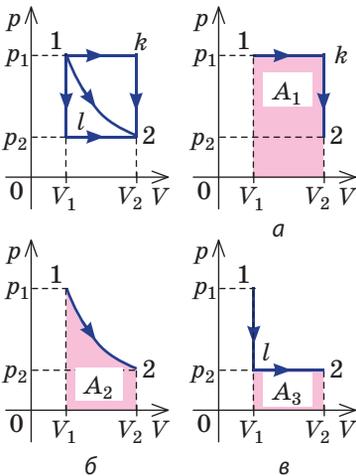
Рис. 37.3. Геометрический смысл работы при изобарном процессе



**Рис. 37.4.** Работа газа численно равна площади криволинейной трапеции под графиком зависимости  $p(V)$



**Рис. 37.5.** При изохорном процессе газ работу не совершает



**Рис. 37.6.** Три пути перехода газа из состояния 1 в состояние 2: а — газ изобарно расширяется (участок  $1k$ ), затем изохорно охлаждается (участок  $k2$ ); б — газ изотермически расширяется; в — газ изохорно охлаждается (участок  $1l$ ), затем изобарно расширяется (участок  $l2$ ). Сравнив площади фигур под графиками, видим, что:  $A_1 > A_2 > A_3$

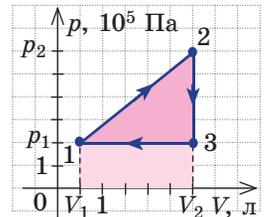
Пусть некоторый газ переходит из состояния 1 в состояние 2 (рис. 37.4). Если изменение объема газа ( $\Delta V$ ) достаточно мало, то давление газа можно считать неизменным. Тогда работа газа численно равна площади выделенной на рисунке полосы. Полная работа при изменении объема от  $V_1$  до  $V_2$  будет равна сумме площадей всех полос, то есть площади криволинейной трапеции под графиком зависимости  $p(V)$ .

Очевидно, что при изохорном процессе ( $V = \text{const}$ ) площадь фигуры под графиком зависимости  $p(V)$  равна нулю (рис. 37.5), — газ работу не совершает ( $A = 0$ ).

Работа газа зависит от того, каким образом происходил переход газа из начального состояния в конечное (рис. 37.6).

### 3 Учимся решать задачи

**Задача.** На рисунке графически изображен циклический процесс, совершаемый идеальным газом. Определите работу газа за цикл.



*Анализ физической проблемы, решение.*

Полная работа за цикл равна сумме работ, совершенных газом в ходе каждого процесса цикла.

Работа газа в ходе процесса 1–2 численно равна площади трапеции, основания которой равны  $p_1$  и  $p_2$ , а высота —  $(V_2 - V_1)$ ; объем газа увеличивается, поэтому работа газа положительна.

Работа газа в ходе процесса 2–3 равна нулю, поскольку этот процесс изохорный.

Работа газа в ходе процесса 3–1 численно равна площади прямоугольника со сторонами  $p_1$  и  $(V_1 - V_2)$ ; объем газа уменьшается, поэтому работа отрицательна.

Следовательно, для определения работы за весь цикл нужно из площади трапеции вычесть площадь прямоугольника. То есть, как видно из рисунка, работа газа за цикл численно равна площади прямоугольного треугольника 1–2–3:

$$A = \frac{(p_2 - p_1) \cdot (V_2 - V_1)}{2}.$$

Необходимые значения величин найдем из

графика:  $p_1 = 2 \cdot 10^5$  Па;  $p_2 = 6 \cdot 10^5$  Па;

$V_1 = 0,5$  л =  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;  $V_2 = 3$  л =  $3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>.

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[A] = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж};$$

$$A = \frac{(6 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5) \cdot (3 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3})}{2} = 5 \cdot 10^2 \text{ (Дж)}.$$

Ответ:  $A = 0,5 \text{ кДж}$ .



### Подводим итоги

- При отсутствии теплообмена с окружающей средой, если над газом совершают работу, внутренняя энергия газа увеличивается; если газ сам совершает работу, его внутренняя энергия уменьшается.
- Если объем газа увеличивается, то газ совершает положительную работу. Если объем газа уменьшается, то работа газа отрицательна.
- Работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости  $p(V)$ . При изобарном процессе работу газа можно определить по формуле  $A = p\Delta V$ , при изохорном процессе работа газа равна нулю:  $A = 0$ .



### Контрольные вопросы

1. Каков геометрический смысл работы газа? 2. Выведите формулу для расчета работы при изобарном процессе. 3. Чему равна работа при изохорном процессе? 4. Зависит ли совершенная газом работа от способа его перехода из одного состояния в другое? Обоснуйте свой ответ.



### Упражнение № 37

1. Приведите примеры изменения внутренней энергии твердых тел, жидкостей и газов в результате совершения работы. Укажите, какую работу — положительную или отрицательную — они при этом совершают.
2. Кислород массой 320 г нагревают изобарно от  $-20$  до  $27$  °С. Определите работу газа в ходе этого процесса.
3. В цилиндре под поршнем находится 2 моль некоторого газа. Какую работу совершит этот газ при изобарном нагревании от  $273$  до  $473$  К?
4. Идеальный газ осуществил циклические процессы, графически изображенные на рис. 1. Определите работу, совершенную газом в ходе каждого цикла.
5. На рис. 2 представлены графики двух замкнутых процессов, происходящих с одним и тем же газом. Во время какого процесса газ совершил большую работу?

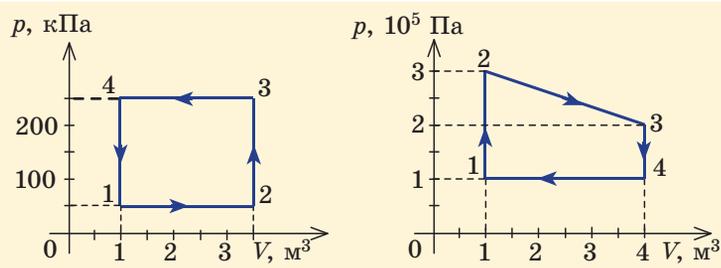


Рис. 1

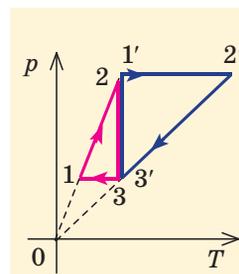


Рис. 2



## § 38. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

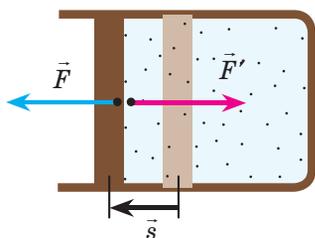


Один из фундаментальных законов природы — закон сохранения и превращения энергии. Первым этот закон сформулировал немецкий врач и физик *Юлиус Роберт фон Майер* (1814–1878). Интересно, что к открытию ученого подтолкнули наблюдения над цветом крови у людей. Майер заметил, что венозная кровь у жителей тропиков светлее, чем у жителей его страны, и по цвету напоминает артериальную. Он сделал вывод, что разница в цвете обусловлена количеством потребления кислорода, или «силой процесса сгорания», происходящего в организме. Независимо от Майера и совсем иначе к открытию закона сохранения энергии пришли английский промышленник и ученый *Джеймс Прескотт Джоуль* (1818–1889) и немецкий физик, физиолог и психолог *Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц* (1821–1894). Закон сохранения и превращения энергии управляет всеми явлениями природы, неизвестно ни одного случая, когда бы этот закон не выполнялся. Из этого параграфа вы узнаете о законе сохранения и превращения энергии в термодинамике.

### 1 Первый закон термодинамики

В термодинамике рассматривают системы, механическая энергия которых при переходе из одного термодинамического состояния в другое не изменяется. Тогда, если внешние силы совершили работу  $A'$  и одновременно системе передано определенное количество теплоты  $Q$ , вся энергия идет на изменение внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ). Закон сохранения и превращения энергии в таком случае называют **первым законом (началом) термодинамики**:

Изменение внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ) при переходе из одного термодинамического состояния в другое равно сумме работы  $A'$  внешних сил и количества теплоты  $Q$ , сообщенного системе или переданного системой окружающим телам в процессе теплообмена:



**Рис. 38.1.** Согласно третьему закону Ньютона сила  $\vec{F}$ , с которой газ давит на поршень, равна по модулю и противоположно направлена внешней силе  $\vec{F}'$ , с которой поршень давит на газ. Поэтому работа внешних сил равна работе газа, взятой с противоположным знаком:  $A' = -A$

$$\Delta U = A' + Q$$

**Обратите внимание!** Если система получает некоторое количество теплоты, то в приведенной формуле  $Q$  берется со знаком «+», если отдает, то со знаком «-». На практике чаще рассматривают не работу  $A'$  внешних сил, а работу  $A$ , совершаемую данной системой против внешних сил. Учитывая, что  $A' = -A$  (рис. 38.1), **первый закон (начало) термодинамики** можно сформулировать так:

Количество теплоты  $Q$ , переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы ( $\Delta U$ ) и на совершение системой работы  $A$  против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A$$

Согласно первому закону термодинамики *невозможно создать вечный двигатель первого рода* — циклическое устройство, которое совершало бы механическую работу без потребления энергии извне (рис. 38.2, а) или совершало бы работу большую, чем потребляемая им энергия (рис. 38.2, б).

## 2 Какой вид имеет первый закон термодинамики для изопроцессов

Рассмотрим, какой вид принимает первый закон термодинамики в случаях, когда идеальному газу неизменной массы передают некоторое количество теплоты таким образом, что один из макроскопических параметров газа ( $V$ ,  $p$  или  $T$ ) остается неизменным.

- **Изохорный процесс** (рис. 38.3). В ходе изохорного процесса объем газа не изменяется ( $\Delta V = 0$ ) и газ работу не совершает ( $A = 0$ ), поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$Q = \Delta U.$$

*При изохорном процессе все переданное газу количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии газа.*

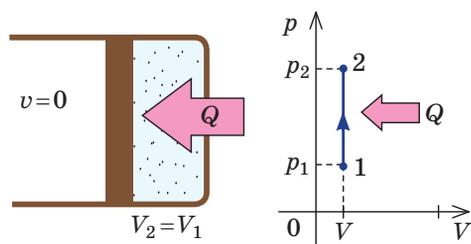
Если идеальный газ одноатомный, то количество теплоты, переданное газу, равно:

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} V \Delta p.$$

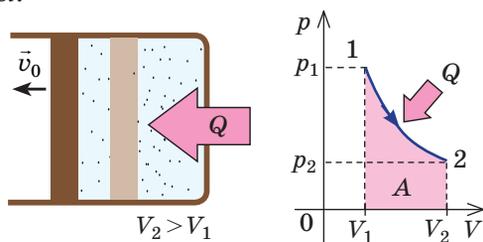
- **Изотермический процесс** (рис. 38.4). В ходе изотермического процесса температура, а значит, и внутренняя энергия газа не изменяются ( $\Delta U = 0$ ), поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$Q = A.$$

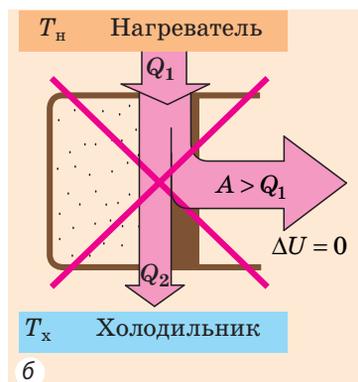
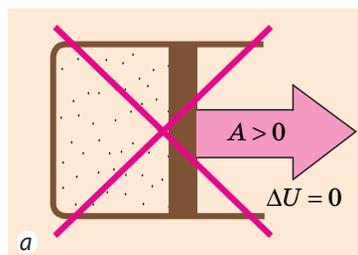
*При изотермическом процессе все переданное газу количество теплоты идет на совершение механической работы.*



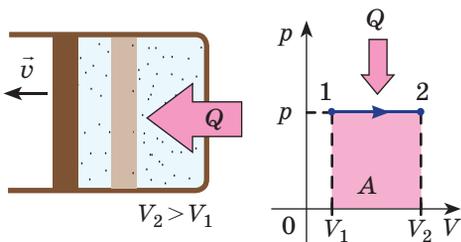
**Рис. 38.3.** Изохорное нагревание газа:  $m = \text{const}$ ;  $V = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U$



**Рис. 38.4.** Изотермическое расширение газа:  $m = \text{const}$ ;  $T = \text{const}$ ;  $Q = A$



**Рис. 38.2.** Циклические процессы, которые невозможны с точки зрения первого закона термодинамики



**Рис. 38.5.** Изобарное расширение газа:  $m = \text{const}$ ;  $p = \text{const}$ ;  $Q = \Delta U + A$

• **Изобарный процесс** (рис. 38.5). В ходе изобарного процесса совершается работа и изменяется внутренняя энергия газа, поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$Q = \Delta U + A.$$

*При изобарном процессе переданное газу количество теплоты идет и на увеличение внутренней энергии газа, и на совершение механической работы.*

Если идеальный газ одноатомный, то работа газа  $A = p\Delta V$ , изменение его внутренней энергии  $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V$ . Количество теплоты, переданное газу, равно:  $Q = \Delta U + A = \frac{3}{2}p\Delta V + p\Delta V = \frac{5}{2}p\Delta V$ , или  $Q = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R\Delta T$ .

### 3 Каковы особенности адиабатного процесса

**Адиабатный процесс** — это процесс, который происходит без теплообмена с окружающей средой.

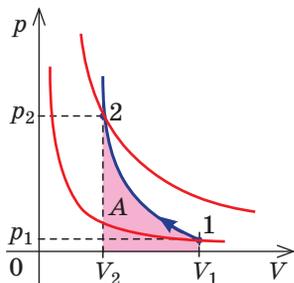
При адиабатном процессе количество теплоты  $Q$ , переданное системе, равно нулю, поэтому первый закон термодинамики имеет вид:

$$\Delta U + A = 0, \text{ или } A = -\Delta U.$$

*При адиабатном расширении газ совершает положительную работу за счет уменьшения внутренней энергии; температура газа уменьшается.*

**?** Докажите, что при адиабатном сжатии внутренняя энергия и температура газа увеличиваются.

Поскольку  $p = nkT$ , при адиабатном сжатии давление газа возрастает намного быстрее, чем при изотермическом, ведь одновременно с увеличением концентрации молекул газа увеличивается и его температура (рис. 38.6). Аналогично при адиабатном расширении давление падает быстрее, чем при изотермическом, ведь одновременно уменьшаются и концентрация, и температура газа.



**Рис. 38.6.** Изменение давления газа в ходе адиабатного сжатия. Синим цветом показана адиабата, красным — изотермы

В реальных условиях процесс, близкий к адиабатному, можно осуществить, если газ будет находиться в оболочке с очень хорошими термоизоляционными свойствами. Адиабатными можно считать и процессы, которые происходят очень быстро: в таком случае газ не успевает обмениваться теплотой с окружающей средой (например, расширение и сжатие воздуха при распространении звуковых волн, расширение газа при взрыве).

Увеличение температуры при резком сжатии воздуха используется в дизельном двигателе, в котором нет системы зажигания горючей смеси (см. § 39).

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача.** При изобарном расширении неон совершил работу 56 Дж. Какое количество теплоты передано газу? Каково изменение его внутренней энергии? При каком давлении происходил процесс, если объем газа увеличился на 2,0 л?

$$A = 56 \text{ Дж}$$

$$\Delta V = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$Q = ?$$

$$\Delta U = ?$$

$$p = ?$$

*Анализ физической проблемы, решение.* Для изобарного процесса работа газа равна:  $A = p\Delta V$ . Отсюда  $p = \frac{A}{\Delta V}$ .

Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа равно:  $\Delta U = \frac{3}{2} p\Delta V = \frac{3}{2} A$ .

Согласно первому закону термодинамики:  $Q = \Delta U + A \Rightarrow Q = \frac{3}{2} A + A = \frac{5}{2} A$ .

Проверим единицу, найдем значения искоемых величин:

$$[p] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}; \quad p = \frac{56}{2,0 \cdot 10^{-3}} = 28 \cdot 10^3 \text{ (Па)};$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 84 \text{ Дж}; \quad Q = \frac{5}{2} \cdot 56 \text{ Дж} = 140 \text{ Дж}.$$

*Ответ:*  $Q = 140 \text{ Дж}; \Delta U = 84 \text{ Дж}; p = 28 \text{ кПа}$ .



#### Подводим итоги

- Закон сохранения энергии, записанный для тепловых процессов, называют первым законом (началом) термодинамики: количество теплоты, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил:  $Q = \Delta U + A$ .

- ♦ При изохорном процессе газ не выполняет работу ( $A = 0$ ), поэтому вся теплота, переданная газу, идет на увеличение его внутренней энергии:  $Q = \Delta U$ .

- ♦ При изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется ( $\Delta U = 0$ ), поэтому вся теплота, переданная газу, идет на совершение газом работы:  $Q = A$ .

- ♦ При изобарном процессе теплота, переданная газу, идет как на увеличение внутренней энергии газа, так и на совершение газом работы:  $Q = \Delta U + A$ .

- ♦ При адиабатном процессе газ не получает теплоты ( $Q = 0$ ), поэтому увеличение его внутренней энергии происходит за счет совершения над газом работы (адиабатное сжатие):  $\Delta U = A'$ . Если газ сам совершает работу (адиабатное расширение), его внутренняя энергия уменьшается:  $A = -\Delta U$ .



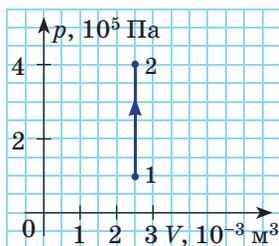
#### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения и превращения энергии. Какие наблюдения подтолкнули Ю. Майера к открытию этого закона?
2. Сформулируйте первый закон термодинамики.
3. Как будет записан первый закон термодинамики для изохорного процесса? изотермического процесса? изобарного процесса?
4. Какой процесс называют адиабатным?
5. Запишите первый закон термодинамики для адиабатного расширения газа; для адиабатного сжатия газа.
6. Почему при адиабатном сжатии давление газа увеличивается гораздо быстрее, чем при изотермическом?

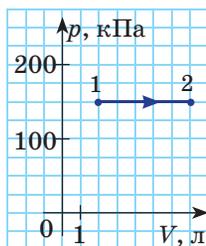


### Упражнение № 38

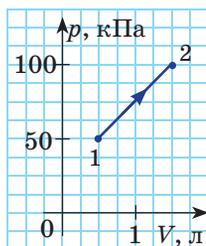
1. При изохорном охлаждении газ передал 15 Дж теплоты. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Какую работу он совершил?
2. При изобарном сжатии гелий отдал окружающей среде 6 Дж теплоты. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Какую работу совершил газ?
3. Газ расширяется от объема  $V_1$  до объема  $V_2$  в одном случае изотермически, во втором — изобарно, в третьем — адиабатно. В каком случае газ совершает большую работу? газу передается большее количество теплоты? внутренняя энергия газа увеличивается на большее значение?
4. На рис. а–г приведены графики процессов, происходящих с идеальным одноатомным газом. Какое количество теплоты передано газу в каждом случае?
5. Температура кислорода массой 3,2 кг при изобарном расширении увеличилась на  $10^\circ\text{C}$ . Какую работу совершил газ? На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Удельная теплоемкость кислорода при неизменном давлении равна  $913 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .
6. Узнайте, какая связь между первым законом термодинамики и образованием облаков.



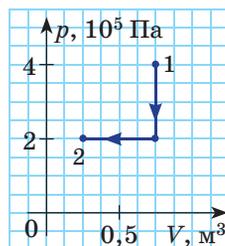
а



б



в



г



## § 39. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ХОЛОДИЛЬНАЯ МАШИНА



На протяжении тысячелетий механизмы существенно облегчали физические нагрузки на человека. Однако до конца XVIII в. огромный запас энергии, содержащийся внутри различных видов топлива, был практически не востребован. И только благодаря открытиям в термодинамике появились *тепловые машины* — устройства, преобразующие внутреннюю энергию в механическую работу. О тепловых машинах и физических законах, на которых основано их действие, вы узнаете из этого параграфа.



### 1 Необратимость процессов в природе

Представьте: вы внесли в дом комочек снега, положили его на стол и, естественно, через некоторое время вместо снега обнаружили лужицу воды. И вдруг на ваших глазах в воде появляется льдинка, которая постепенно увеличивается, — и вскоре вместо лужицы вы видите горку пушистого снега. «Это невозможно!», — скажете вы и будете правы, поскольку знаете, что в теплой комнате снег всегда превращается в воду, но вода никогда *самопроизвольно* не превратится в снег.

Другой пример. Поднимаясь на гору, вы наступаете на камень, он срысывается, катится по склону и, прокатившись какое-то расстояние, останавливается. При этом механическая энергия камня превращается во внутреннюю энергию самого камня, склона и окружающего воздуха. С точки зрения закона сохранения энергии возможен и обратный процесс, когда камень катится вверх за счет накопленной в нем и окружающей среде внутренней энергии. Однако на практике такой процесс не наблюдается.

Эти примеры и множество других убеждают: *в природе все макроскопические процессы имеют определенное направление, и в обратном направлении они самопроизвольно происходить не могут.*

Процессы, которые могут самопроизвольно происходить только в одном направлении, называют **необратимыми процессами**.

Необратимость процессов в природе отражает **второй закон (начало) термодинамики**, который имеет *несколько эквивалентных формулировок*. Например, в формулировке немецкого физика и математика **Рудольфа Клаузиуса** он звучит так:

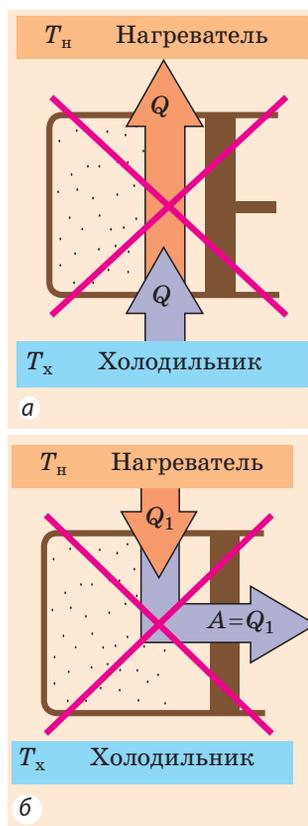
Невозможен процесс, единственным результатом которого — передача энергии в форме теплоты от менее нагретого тела к более нагретому (рис. 39.1, а).

Обратите внимание на слова «*единственный результат*». Тепло самопроизвольно передается только от более нагретого тела к менее нагретому, при этом с другими телами никаких изменений не происходит. Обратный процесс тоже возможен, но результат *не будет единственным*. Например, в холодильной установке тепло передается от менее нагретой холодильной камеры более теплому окружающему воздуху, но при этом расходуется электрическая энергия.

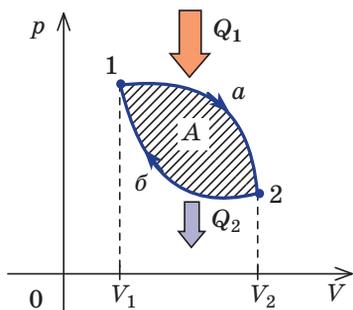
Английский физик **Уильям Томсон (лорд Кельвин)** дал в 1851 г. следующую формулировку **второго закона (начала) термодинамики**:

Невозможен периодический процесс, единственным результатом которого — совершение телом механической работы за счет уменьшения его внутренней энергии.

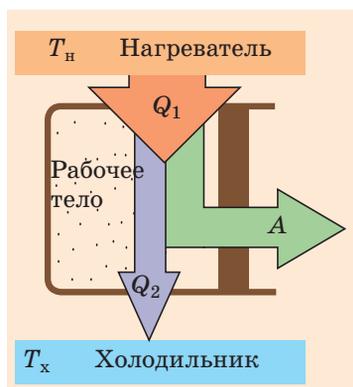
Если бы такой процесс был возможен, то мы получили бы *вечный двигатель второго рода* (рис. 39.1, б). Такая машина, например, могла бы отбирать тепловую энергию у Мирового океана и полностью превращать ее в работу.



**Рис. 39.1.** Циклические процессы, «разрешенные» первым законом термодинамики, но «запрещенные» вторым законом: а — идеальная холодильная машина; б — вечный двигатель второго рода



**Рис. 39.2.** Если расширение газа (участок 1а2) происходит при большем давлении, чем сжатие (участок 2б1), то работа за цикл положительна (эта работа соответствует площади фигуры 1а2б1)



**Рис. 39.3.** Принцип работы тепловых двигателей: рабочее тело, получая определенное количество теплоты  $Q_1$  от нагревателя, совершает механическую работу  $A$  и передает некоторое количество теплоты  $Q_2$  холодильнику

## 2 Как работает тепловой двигатель

Процессы, не противоречащие ни первому, ни второму законам термодинамики, происходят в тепловых машинах. В качестве примера рассмотрим работу *теплового двигателя*.

**Тепловой двигатель** — тепловая машина циклического действия, которая энергию, выделяющуюся при сгорании топлива, преобразует в механическую работу.

Работу в двигателе совершает газ, который, расширяясь, давит на поршень. Газ, совершающий механическую работу в процессе своего расширения, называют *рабочим телом*.

Чтобы газ мог толкать поршень, необходимо, чтобы давление под поршнем было больше внешнего давления. Такое повышение давления достигается за счет увеличения температуры рабочего тела. Устройство, в контакте с которым рабочее тело получает определенное количество теплоты, называют *нагревателем*.

Рабочее тело не может бесконечно расширяться. Для непрерывной работы двигателя необходимо, чтобы поршень возвращался в исходное положение. Газ при этом будет сжиматься, совершая отрицательную работу. Чтобы в целом за цикл работа газа была положительной, давление, а значит, и температура газа при сжатии должны быть меньше, чем его давление и температура во время расширения (рис. 39.2), то есть газ нужно охлаждать. Объект, в контакте с которым от рабочего тела забирается некоторое количество теплоты, называют *холодильником*.

Любой тепловой двигатель состоит из трех основных частей: *нагревателя, рабочего тела, холодильника* (рис. 39.3).

В тепловом двигателе осуществляется циклический периодический процесс, в результате которого за счет уменьшения внутренней энергии нагревателя совершается механическая работа. Однако этот результат не единственный, так как часть энергии передается холодильнику.

## 3 Может ли КПД тепловой машины быть равным 100 %

Внутренняя энергия рабочего тела за цикл не изменяется (внутренняя энергия — функция состояния, а после окончания цикла газ возвращается в исходное состояние), поэтому согласно первому закону термодинамики работа  $A$ , совершаемая газом за цикл, равна:  $A = Q_1 - Q_2$ , где  $Q_1$  — количество

теплоты, полученное от нагревателя;  $Q_2$  — количество теплоты, отданное холодильнику. Чем меньше тепла отдается холодильнику (теряется), тем больше КПД теплового двигателя.

**Коэффициент полезного действия  $\eta$  двигателя** — физическая величина, которая характеризует экономичность теплового двигателя и равна отношению работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, получаемому от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}; \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

*Обратите внимание!* 1. Если в тепловом двигателе сгорает топливо, то  $Q_1 = qt$ , где  $q$  — удельная теплота сгорания топлива;  $m$  — масса топлива. 2. КПД теплового двигателя всегда меньше единицы.

Анализируя работу тепловых двигателей, французский инженер *Сади Карно* (1796–1832) пришел к выводу, что наиболее эффективен (с максимально возможным КПД  $\eta_{\max}$ ) так называемый *идеальный тепловой двигатель*, работающий по циклу, состоящему из двух изотермических и двух адиабатных процессов (рис. 39.4); КПД такого двигателя равен:

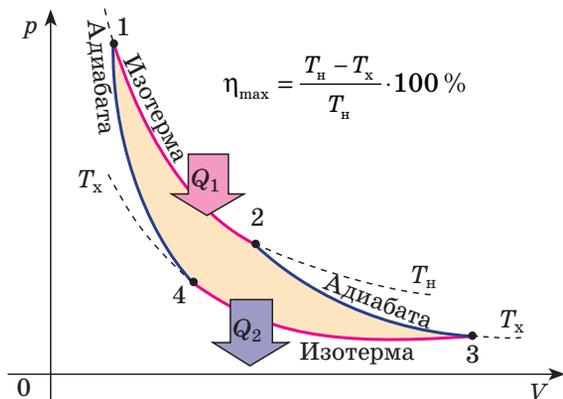
$$\eta_{\max} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}},$$

где  $T_{\text{н}}$  — температура нагревателя;  $T_{\text{х}}$  — температура холодильника.

**Второй закон (начало) термодинамики** в формулировке *С. Карно*:

Любая реальная тепловая машина, которая работает с нагревателем, имеющим температуру  $T_{\text{н}}$ , и холодильником с температурой  $T_{\text{х}}$ , не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины.

Получается, что для увеличения КПД теплового двигателя нужно уменьшить температуру холодильника и (или) увеличить температуру нагревателя. Однако температуру холодильника нельзя уменьшить до температуры ниже, чем температура окружающей среды, а температура нагревателя ограничена жаростойкостью материалов, из которых изготовлены поршень и цилиндр двигателя. Поэтому максимальный КПД не может превышать 60–70 %. Сейчас усилия инженеров направлены на увеличение КПД за счет уменьшения потерь энергии при трении и потерь топлива вследствие его неполного сгорания.



**Рис. 39.4.** Цикл Карно: 1–2 — изотермическое расширение при температуре  $T_{\text{н}}$ , рабочее тело получает теплоту  $Q_1$ ; 2–3 — адиабатное расширение, уменьшение температуры до  $T_{\text{х}}$ , теплообмена нет; 3–4 — изотермическое сжатие при температуре  $T_{\text{х}}$ , рабочее тело отдает теплоту  $Q_2$ ; 4–1 — адиабатное сжатие, увеличение температуры до  $T_{\text{н}}$

#### 4 Как работают дизельные двигатели

Современную цивилизацию невозможно представить без тепловых двигателей. Наиболее широко они используются в тепловых и атомных электростанциях, где мощные паровые турбины вращают роторы генераторов электрического тока, а также в большинстве видов транспорта. На мощных самолетах и ракетах устанавливают турбореактивные и реактивные двигатели, на легких самолетах — поршневые. Водные суда могут быть оснащены как дизельными двигателями, так и турбинами. Карбюраторные и дизельные двигатели приводят в движение большинство автомобилей.

В курсе физики 8 класса вы ознакомились с работой карбюраторного двигателя внутреннего сгорания. Рассмотрим, как работает *дизельный двигатель*.

В отличие от карбюраторного двигателя (в котором горючая смесь образуется вне цилиндра и воспламеняется от электрической искры), в дизельных двигателях горючая смесь образуется непосредственно внутри цилиндра, а зажигается в результате повышения температуры воздуха при сжатии (рис. 39.5).

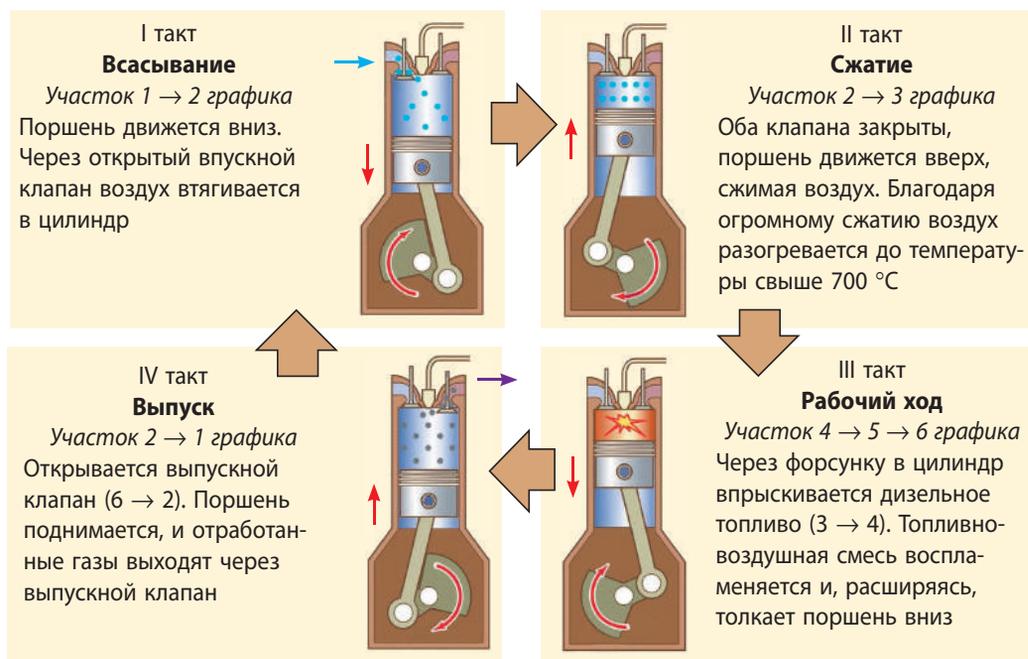
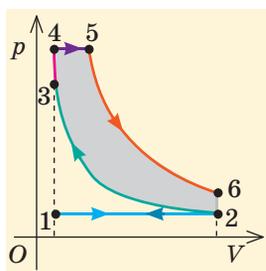


Рис. 39.5. График цикла и принцип работы четырехтактного дизельного двигателя

Несмотря на удобство и пользу, тепловые двигатели загрязняют окружающую среду (выбросы вредных веществ, тепловое загрязнение и т. д.). К сожалению, сейчас человечество не может отказаться от использования тепловых двигателей, поэтому связанные с этим экологические проблемы нужно решать.

**?** Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, какие международные программы по защите окружающей среды сейчас реализуются.

### 5 Как работает холодильная установка

**Холодильная установка** — это устройство циклического действия, которое поддерживает в холодильной камере температуру более низкую, чем температура окружающей среды.

Принцип работы холодильной установки показан на рис. 39.6. Рабочим телом в холодильной установке служит *хладагент* — пар легкоиспаряющейся жидкости. При сжатии хладагент конденсируется, выделяя большое количество теплоты  $Q_1$ , которое через теплообменник передается окружающей среде. Сжатие газа осуществляется *компрессором*, который совершает механическую работу  $A'$  за счет электроэнергии.

В испарителе хладагент испаряется, поглощая при этом количество теплоты  $Q_2$ . Поскольку сжатие газа происходит при более высоком давлении, чем расширение, то работа газа за цикл отрицательна и равна:  $A = Q_2 - Q_1$ .

Внешние силы за цикл совершают положительную работу:  $A' = Q_1 - Q_2$ .

Физическая величина, которая характеризует эффективность работы холодильной установки и равна отношению количества теплоты, полученного от холодильной камеры, к работе внешних сил, называется **холодильным коэффициентом**:

$$k = \frac{Q_2}{A'}; \quad k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

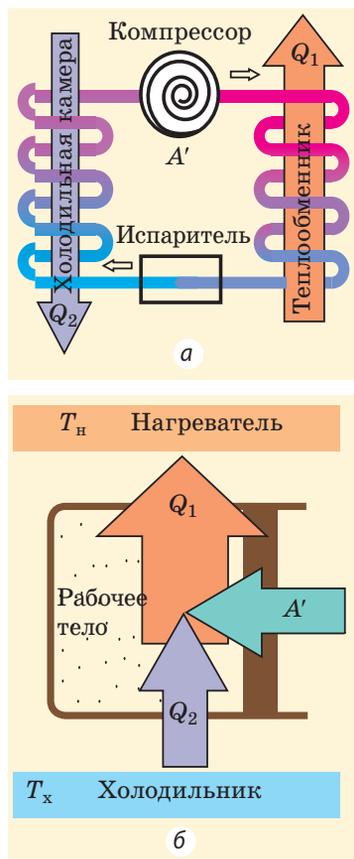
Из второго закона термодинамики следует, что **максимальный холодильный коэффициент** равен:

$$k_{\max} = \frac{T_x}{T_n - T_x}$$

*Обратите внимание:* холодильный коэффициент может быть больше единицы.

Если трубки теплообменника вынести за пределы помещения, а холодильную камеру оставить открытой, то холодильная установка будет забирать тепло из помещения и отдавать его окружающей среде. Так работает *кондиционер* — *электрическое устройство, предназначенное для охлаждения воздуха в помещении*.

Если трубки теплообменника оставить в помещении, а открытую холодильную камеру вынести за его пределы, то холодильная установка будет забирать тепло из окружающей



**Рис. 39.6.** Устройство (а) и принцип работы (б) холодильной установки: рабочее тело расширяется и совершает работу, получая количество теплоты  $Q_2$  от холодильной камеры. За счет работы  $A'$  внешних сил рабочее тело сжимается, при этом окружающей среде передается количество теплоты  $Q_1 = Q_2 + A'$

среды и отдавать его помещению. Так работает *тепловой насос* — устройство для обогрева помещения. Интересно, что тепловой насос работает эффективнее обычного электрического обогревателя: при работе теплового насоса переданное помещению количество теплоты ( $Q_2 = A' + Q_1$ ) больше работы  $A'$  электрического тока. Современные кондиционеры имеют два режима работы: летом они работают как кондиционеры, зимой — как тепловые насосы.



### Подводим итоги

- Все макроскопические процессы в природе необратимы — они могут самопроизвольно происходить только в одном направлении. Необратимость процессов в природе отражает второй закон термодинамики, который можно сформулировать так: невозможен периодический процесс, единственный результат которого — совершение телом механической работы за счет уменьшения его внутренней энергии.

- Тепловой двигатель — тепловая машина циклического действия, которая энергию, выделяющуюся при сгорании топлива, преобразует в механическую работу. Любой тепловой двигатель состоит из трех частей: нагреватель, рабочее тело, холодильник. КПД теплового двигателя определяют по

формуле  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ ; он не может превышать КПД цикла Карно:

$$\eta_{\max} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}.$$

- Холодильная установка — устройство циклического действия, которое поддерживает в холодильной камере температуру более низкую, чем температура окружающей среды.



### Контрольные вопросы

1. Приведите примеры природных процессов и докажите, что они необратимы.
2. Приведите примеры условных процессов, которые не противоречат первому началу термодинамики, но противоречат второму.
3. Дайте определение теплового двигателя. Каковы его основные элементы?
4. Как определить КПД теплового двигателя? Какие существуют возможности увеличения КПД?
5. Как определить КПД цикла Карно?
6. Как работает холодильная установка? Приведите примеры различных холодильных установок. В чем их отличие?
7. Что показывает холодильный коэффициент?



### Упражнение № 39

1. Можно ли, открыв дверцу работающего холодильника, охладить воздух в комнате?
2. Тепловая машина работает по циклу Карно. Определите КПД машины, если температура нагревателя по шкале Кельвина больше температуры холодильника: а) в 2 раза, б) в 3 раза, г) в  $n$  раз.
3. Рабочее тело получило от нагревателя 240 Дж теплоты, а отдало холодильнику — 150 Дж. Определите КПД двигателя и совершенную им работу.
4. В тепловой машине мощностью 1,0 кВт, работающей по циклу Карно, нагревателем служит кипящая вода, а холодильником — тающий лед. Какая масса льда тает при работе машины за 1 мин?  $\lambda_{\text{льда}} = 330 \text{ кДж/кг}$ .

# ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА III «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА». Часть 2. Основы термодинамики

1. Вы узнали, что в основе термодинамики лежит понятие *внутренней энергии*.

**Внутренняя энергия  $U$**  — сумма кинетических энергий хаотического движения частиц вещества и потенциальных энергий их взаимодействия

## Способы изменения внутренней энергии

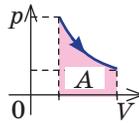
### Теплопередача

*Количество теплоты:*

- ◆ нагревание/охлаждение вещества:  $Q = cm\Delta T = C\Delta T$
- ◆ плавление/кристаллизация вещества:  $Q = \lambda m$
- ◆ парообразование/конденсация вещества:  $Q = Lm$ ,  
 $Q = rm$

### Работа

Численно равна площади фигуры под графиком зависимости  $p(V)$



### Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R\Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot (p_2V_2 - p_1V_1)$$

2. Вы ознакомились с *законом сохранения и превращения энергии в термодинамике*.

## Первый закон термодинамики: $Q = \Delta U + A$

Адиабатный процесс:  
 $Q = 0$ ,  
 $A = -\Delta U$

Изотермический процесс:  
 $\Delta U = 0$ ,  
 $Q = A$

Изобарный процесс:  
 $Q = \Delta U + A$ ,  
 $Q = \Delta U + p\Delta V$

Изохорный процесс:  
 $A = 0$ ,  
 $Q = \Delta U$

3. Вы вспомнили *принцип действия тепловых двигателей*:



4. Вы узнали о *принципе работы холодильной установки*:



5. Вы выяснили, почему *КПД тепловой машины всегда меньше 100 %*, узнали, как рассчитать КПД  $\eta$  и определить *холодильный коэффициент  $k$* .

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$\eta_{\max} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}$$

$$k = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$k_{\max} = \frac{T_{\text{х}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}$$



## РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



### § 40. АЗБУКА ЭЛЕКТРОСТАТИКИ



Все виды сил упругости и трения имеют электромагнитную природу; жизнедеятельность растений, организмов животных и людей основана на электромагнитных взаимодействиях. Изучает это взаимодействие *электродинамика* — наука о свойствах электромагнитного поля, посредством которого осуществляется взаимодействие электрически заряженных тел или частиц. Если электрически заряженные тела или частицы находятся в покое, их взаимодействие рассматривается в разделе электродинамики, который называют *электростатикой*. С основами электростатики вы ознакомились в курсе физики 8 класса. А вот чтобы идти дальше, необходимо вспомнить базовые понятия.

#### 1 Что такое электрический заряд

**Электрический заряд  $q$**  — это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитное взаимодействие.

*Единица электрического заряда в СИ — кулон:  $[q]=1$  Кл (С).*

*1 кулон равен заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 секунду, если сила тока в проводнике 1 ампер:*

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} \quad (1 \text{ С} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}).$$

#### Основные свойства электрического заряда

1. Существует два рода электрических зарядов — *положительные* и *отрицательные*. Электрический заряд такого рода, как заряд, полученный на янтаре или эбонитовой палочке, потертых о шерсть, принято называть отрицательным, а такого рода, как заряд, полученный на палочке из стекла, потертой о шелк, — положительным.

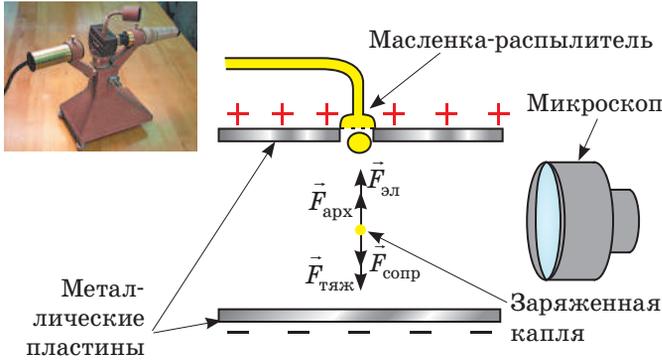
2. Тела, имеющие заряды одного знака, *отталкиваются*; тела, имеющие заряды противоположных знаков, *притягиваются*.

3. *Носитель* электрического заряда — *частица*; электрический заряд не существует отдельно от частицы.

4. Электрический заряд является *дискретным*, то есть электрические заряды физических тел кратны определенному наименьшему (элементарному) заряду. *Носитель наименьшего отрицательного заряда — электрон*. Этот заряд обычно обозначают символом  $e$ ; его значение:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. *Носитель наименьшего положительного заряда — протон*. Заряд протона по модулю равен заряду электрона. Если  $q$  — заряд тела,  $e$  — заряд электрона,  $N$  — целое число, то  $|q| = N|e|$ .

#### 2 Как был измерен заряд электрона

Первым достаточно точно измерил элементарный заряд американский физик-экспериментатор *Роберт Эндрюс Милликен* (1868–1953) в начале XX в. Схема его опыта представлена на рис. 40.1. В пространство между



**Рис. 40.1.** Устройство для опыта и схема опыта Р. Милликена по определению заряда электрона. На каплю, попадающую между пластинами, действуют сила тяжести ( $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ), сила сопротивления воздуха ( $\vec{F}_{\text{сопр}}$ ), архимедова сила ( $\vec{F}_{\text{арх}}$ ) и сила со стороны электрического поля заряженных пластин ( $\vec{F}_{\text{эл}}$ )

заряженными пластинами, заряд на которых можно было плавно изменять, ученый впрыскивал масло. При впрыскивании образовывались очень маленькие капельки, и некоторые из них несли отрицательный заряд.

Каждый раз Милликен наблюдал за отдельной заряженной каплей. Плавно изменяя заряд пластин, ученый добивался, чтобы капля равномерно поднималась вверх. Понятно, что в этом случае силы, действующие на каплю, были скомпенсированы. Учитывая это, а также то, что сила  $\vec{F}_{\text{эл}}$ , действующая на каплю со стороны пластин, прямо пропорциональна заряду капли, ученый вычислял заряд капли.

Многokrатно повторяя измерения, Милликен выяснил, что каждый раз заряд  $q$  капли был кратным некоторому наименьшему заряду:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. То есть  $q = Ne$ , где  $N$  — целое число. Исследуемые капли были заряжены отрицательно, то есть имели избыточное количество электронов. Поэтому ученый сделал вывод, что наименьший заряд — это заряд электрона.

Важный результат работы Милликена — не только определение заряда электрона, но и доказательство дискретности электрического заряда.

### 3 Что происходит при электризации

**Электризация** — это процесс приобретения электрического заряда макроскопическими телами или их частями.

Есть несколько способов электризации, среди них — *электризация трением (трибоэлектричество)*. Вы уже знаете, что в процессе электризации трением происходит тесный контакт двух тел, изготовленных из различных материалов, и часть электронов переходит с одного тела на другое. После разъединения тел оказывается, что тело, отдавшее часть своих электронов, заряжено *положительно*, а тело, получившее эти электроны, заряжено *отрицательно* (рис. 40.2).

При любом способе электризации тел происходит *перераспределение* имеющихся в них электрических зарядов, а не появление новых. Это утверждение



**Рис. 40.2.** При трении часть электронов со стеклянной палочки перейдет на лоскут шелка, в результате чего стеклянная палочка приобретет положительный заряд, а лоскут шелка — отрицательный

является следствием одного из важнейших законов природы — **закона сохранения электрического заряда**:

Полный заряд электрически замкнутой системы тел остается неизменным при любых взаимодействиях, происходящих в этой системе:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряды тел, образующих систему;  $n$  — количество тел.

Если перед электризацией трением и палочка, и ткань (см. рис. 40.2) были незаряженными, то после трения они окажутся заряженными, причем их заряды будут одинаковы по модулю и противоположны по знаку. То есть их суммарный заряд, как и перед опытом, будет равен нулю.

#### 4 Что определяет закон Кулона

Французский физик *Шарль Кулон* (1736–1806) экспериментально установил закон, который стал *основным законом электростатики* и был назван в его честь — **закон Кулона**:

Сила  $F$  взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коэффициент пропорциональности. Напомним: **точечный заряд** — это физическая модель заряженного тела, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от него до других рассматриваемых заряженных тел.

**Коэффициент пропорциональности  $k$**  численно равен силе, с которой взаимодействуют два точечных заряда по 1 Кл каждый, расположенные в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга.

Иногда вместо коэффициента  $k$  применяют *другой коэффициент* —  $\epsilon_0$ , который называют **электрическая постоянная**:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Тогда запись закона Кулона имеет вид:

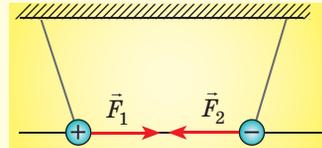
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}.$$

*Обратите внимание!*

- В законе Кулона говорится о произведении *модулей* зарядов, так как знаки зарядов влияют только на направление силы.

- Силы, с которыми взаимодействуют точечные заряды, обычно называют *кулоновскими силами*.

- Кулоновские силы *направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие точечные заряды*.



- Если нужно определить силу взаимодействия трех зарядов или более, сначала определяют силы взаимодействия одного заряда с каждым из остальных зарядов, а затем рассчитывают результирующую.

- Если заряды переместить из вакуума в диэлектрик, то сила их взаимодействия уменьшится в  $\epsilon$  раз:  $F = k \frac{|q_1| |q_2|}{\epsilon r^2}$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (см. § 43).

**5 Учимся решать задачи**

**Задача.** На прямой, соединяющей положительный заряд  $q_1$  и отрицательный заряд  $q_2$ , каждый из которых равен по модулю  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл, расположен заряд  $q_3 = -1 \cdot 10^{-8}$  Кл. Расстояние  $r_1$  между зарядами  $q_1$  и  $q_3$  равно 6 см, расстояние  $r_2$  между зарядами  $q_2$  и  $q_3$  равно 3 см. Вычислите силу, действующую на заряд  $q_3$ , если он расположен между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ .

Дано:

$$|q_1| = |q_2| = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$|q_3| = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

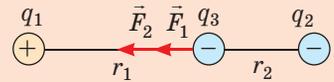
$$r_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$\vec{F}$  — ?

Анализ физической проблемы, решение

Выполним пояснительный рисунок, на котором покажем силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , действующие на заряд  $q_3$  со стороны зарядов  $q_1$  и  $q_2$ . Как видно из рисунка, модуль равнодействующей силы  $\vec{F}$ , с которой заряды  $q_1$  и  $q_2$  действуют на заряд  $q_3$ , равен:



$$F = F_1 + F_2. \text{ По закону Кулона: } F_1 = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_1^2}; F_2 = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_2^2}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:  $[F] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} = \text{Н};$

$$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)}; F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{9 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ (Н)};$$

$$F = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н} + 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н} = 6,25 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$$

Ответ:  $F = 62,5 \text{ мН}.$



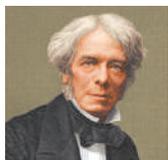
**Контрольные вопросы**

1. Что называют электрическим зарядом?
2. Назовите единицу электрического заряда.
3. Какие роды зарядов существуют?
4. Как взаимодействуют тела, имеющие заряды одного знака? противоположных знаков?
5. Какая частица имеет наименьший отрицательный заряд? наименьший положительный заряд?
6. Как вы понимаете утверждение, что электрический заряд является дискретным?
7. Кто и как первым измерил заряд электрона?
8. Если электронейтральное тело отдаст часть своих электронов, заряд какого знака оно будет иметь?
9. Почему при электризации трением электризуются оба тела?
10. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
11. Сформулируйте закон Кулона.



**Упражнение № 40**

1. Как ведут себя ваши волосы сразу после того, как вы сняли через голову свитер, изготовленный, например, из акрила? Почему?
2. Как изменится сила взаимодействия двух зарядов, если расстояние между ними увеличить в 4 раза, а модуль каждого заряда увеличить в 2 раза?
3. Два одинаковых маленьких металлических шарика заряжены так, что модуль заряда одного из них в 5 раз больше, чем модуль заряда другого. Шарики заставили соприкоснуться и развели на начальное расстояние. Во сколько раз изменилась сила взаимодействия шариков, если перед соприкосновением они были заряжены одноименно? разноименно?
4. На шелковой нити подвесили маленький шарик, имеющий заряд  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл и массу 2 г. После того как снизу к нему поднесли второй заряженный шарик, сила натяжения нити, действующая на первый шарик, увеличилась в 2 раза. Определите расстояние между шариками, если их заряды равны по модулю.



Майкл Фарадей  
(1791–1867)

Каков механизм взаимодействия зарядов? Каким образом заряды «чувствуют» друг друга и взаимодействуют на расстоянии? Поиск ответов на эти и многие другие вопросы привел английского физика *Майкла Фарадея* к идее *поля*, которую *Альберт Эйнштейн* позже назвал важнейшим открытием со времен Ньютона. В курсе физики вы уже встречались с понятием поля, а сейчас ознакомьтесь с ним подробнее.

### 1 Что называют электрическим полем

Согласно идее М. Фарадея *электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле, и взаимодействие зарядов происходит через их поля*. Например, взаимодействие двух электрических зарядов  $q_1$  и  $q_2$  сводится к тому, что электрическое поле заряда  $q_1$  действует на заряд  $q_2$ , а поле заряда  $q_2$  действует на заряд  $q_1$ .

*Электрическое поле распространяется в пространстве с огромной, но конечной скоростью, — со скоростью распространения света*. Благодаря этому свойству взаимодействие между двумя зарядами начинается не мгновенно, а через определенный интервал времени  $\Delta t$ . Такую задержку взаимодействия трудно обнаружить на расстояниях в несколько метров, но в космических масштабах она достаточно заметна.

Человек не может непосредственно, с помощью органов чувств, воспринимать электрическое поле, однако его *материальность*, то есть объективность существования, доказана экспериментально.

**Электрическое поле** — форма материи, которая существует вокруг заряженных тел и проявляется в действии с некоторой силой на любое заряженное тело, находящееся в этом поле.

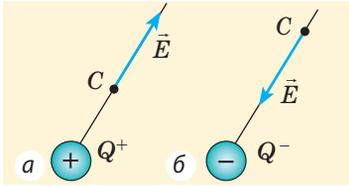
*Электрическое поле является составляющей единого электромагнитного поля*. Источниками электрического поля могут быть подвижные и неподвижные электрические заряды и переменные магнитные поля.

Электрическое поле, созданное *неподвижными* зарядами, постоянно во времени (*статично*). Такое поле называют **электростатическим**.

### 2 Что считают силовой характеристикой электрического поля

Электрическое поле, окружающее заряженное тело, можно исследовать с помощью *пробного заряда*. Понятно, что он не должен изменять исследуемое поле, потому в качестве пробного заряда целесообразно использовать небольшой по значению *точечный заряд*.

Итак, для изучения электрического поля в некоторой точке следует в эту точку поместить пробный заряд  $q$  и измерить действующую на него силу  $\vec{F}$ . Очевидно, что в точке, где на заряд действует большая сила, электрическое поле сильнее. Однако сила, действующая на пробный заряд в электрическом поле, зависит от этого заряда. А вот отношение  $\frac{\vec{F}}{q}$  от заряда не зависит, поэтому это отношение можно рассматривать как *силовую характеристику поля*.



**Рис. 41.1.** Определение направления вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля в некоторой точке  $C$ :

$a$  — поле создано положительным точечным зарядом  $Q^+$ ;  $b$  — поле создано отрицательным точечным зарядом  $Q^-$

*Обратите внимание!*

1. Формула  $E = k \frac{|Q|}{r^2}$  справедлива и для напряженности поля равномерно заряженной сферы на расстояниях, больших ее радиуса или равных ему, поскольку поле сферы вне сферы и на ее поверхности совпадает с полем точечного заряда, помещенного в центр сферы.

2. Если пространство вокруг заряда заполнить диэлектриком, то напряженность электрического поля, созданного этим зарядом, уменьшится в  $\epsilon$  раз:

$E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (см. § 43).

**Напряженность электрического поля  $\vec{E}$  в данной точке** — векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле и равная отношению силы  $\vec{F}$ , с которой электрическое поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к значению  $q$  этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

*За направление вектора напряженности в данной точке электрического поля принимают направление силы, которая действовала бы на пробный положительный заряд, если бы он был помещен в данную точку поля (рис. 41.1).*

Формула  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  позволяет определить единицу напряженности электрического поля:

$$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{С}} \right).$$

Пусть точечным зарядом  $Q$  создано электрическое поле в вакууме. Исследуем это поле с помощью пробного заряда  $q$ , расположенного на расстоянии  $r$  от заряда  $Q$ . Со стороны поля на пробный заряд  $q$  действует сила Кулона:

$$F = k \frac{|Q| \cdot |q|}{r^2}. \text{ Модуль напряженности } E = \frac{F}{|q|}.$$

После подстановки получим формулу для вычисления модуля напряженности  $\vec{E}$  электрического поля, созданного в вакууме точечным зарядом  $Q$  на расстоянии  $r$  от этого заряда:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}, \text{ или } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{r^2}.$$

### 3 В чем суть принципа суперпозиции полей

Зная напряженность  $\vec{E}$  электрического поля, созданного некоторым зарядом в данной точке пространства, нетрудно определить модуль и направление вектора силы, с которой поле будет действовать на заряд  $q$ , помещенный в эту точку:  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

Если же поле создано несколькими зарядами, то результирующая сила, действующая на пробный заряд со стороны системы зарядов, определяется геометрической суммой сил, с которыми эти заряды действуют на данный пробный заряд:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ .

Отсюда следует **принцип суперпозиции (наложения) электрических полей**:

Напряженность электрического поля системы зарядов в данной точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых этими зарядами в данной точке (рис. 41.2):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

#### 4 Как сделать видимым распределение поля в пространстве

Электрическое поле можно изобразить *графически*, используя *линии напряженности электрического поля (силовые линии)*, — линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля (рис. 41.3).

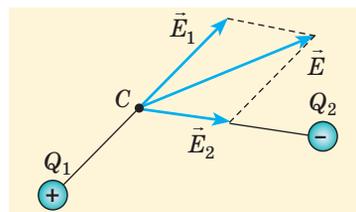
Силовые линии электрического поля имеют *общие свойства* (это следует из их определения): они не пересекаются; не имеют изломов; начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных.

Очень просто построить силовые линии поля, созданного неподвижным уединенным точечным зарядом (рис. 41.4). Такие «семьи» силовых линий полей точечных зарядов показывают, что заряды являются источниками поля.

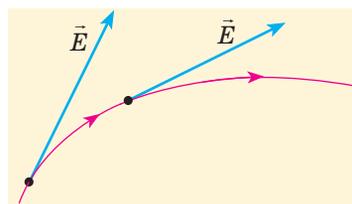
На основании картины силовых линий можно сделать вывод не только о направлении вектора напряженности  $\vec{E}$ , но и о его модуле. Действительно, для точечных зарядов напряженность поля возрастает по мере приближения к заряду, и, как видно из рис. 41.4, силовые линии при этом сгущаются.

Если в некоторой области пространства линии напряженности параллельны и расстояния между ними одинаковы, то одинакова и напряженность поля в этой области. Электрическое поле, напряженность которого одинакова во всех точках, называют *однородным*.

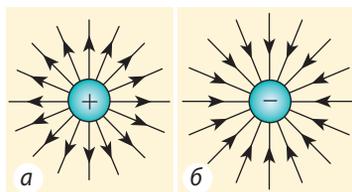
Построить точную картину силовых линий электрического поля, созданного любым заряженным телом, достаточно трудно, поэтому обычно ограничиваются приблизительной картиной, руководствуясь определенной симметрией в расположении зарядов (рис. 41.5).



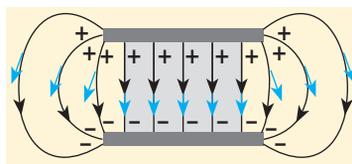
**Рис. 41.2.** Определение напряженности электрического поля в точке  $C$ . Поле создано двумя точечными зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$



**Рис. 41.3.** Силовая линия электрического поля (на рисунке изображена красным)



**Рис. 41.4.** Силовые линии электростатического поля, созданного точечным зарядом:  $a$  — положительным;  $b$  — отрицательным



**Рис. 41.5.** Картина силовых линий электрического поля, созданного системой двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку. Синим обозначены направления векторов напряженности

Обратите внимание на картину силовых линий поля, созданного системой двух разноименно заряженных пластин (см. рис. 41.5): в области пространства между пластинами, расположенной сравнительно далеко от краев пластин (на рисунке эта область закрашена), линии напряженности параллельны и расстояния между ними одинаковы, то есть поле в этой области является однородным.



### Подводим итоги

- Электрическое поле — это форма материи, которая существует вокруг заряженных тел и проявляется в действии с некоторой силой на любое заряженное тело, находящееся в этом поле.
- Силовая характеристика электрического поля — напряженность  $\vec{E}$ :  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ . Напряженность электрического поля системы зарядов в данной точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых этими зарядами в данной точке:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$ .
- Для графического изображения полей используют линии напряженности электрического поля (силовые линии), — линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора напряженности.



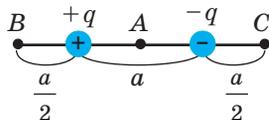
### Контрольные вопросы

1. Что называют электрическим полем?
2. Какие объекты создают электрическое поле?
3. Что является силовой характеристикой электрического поля? По какой формуле ее рассчитывают?
4. Как определить напряженность поля, созданного точечным зарядом  $Q$ ?
5. В чем заключается принцип суперпозиции полей?
6. Что называют линией напряженности электрического поля?
7. Могут ли линии напряженности электрического поля пересекаться? быть параллельными?



### Упражнение № 41

1. С какой силой электрическое поле напряженностью 250 Н/Кл действует на заряд 40 нКл?
2. Точечный электрический заряд  $8 \cdot 10^{-10}$  Кл расположен в некоторой точке электрического поля. Определите напряженность электрического поля в этой точке, если известно, что поле действует на заряд с силой  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.
3. Как будет двигаться электрон, который влетел в однородное электрическое поле: а) в направлении, противоположном направлению силовых линий? б) перпендикулярно направлению силовых линий? Как будет двигаться в таких случаях протон?
4. Напряженность поля точечного заряда на расстоянии 30 см от этого заряда — 600 Н/Кл. Чему равна напряженность поля на расстоянии 10 см от заряда?
5. В вершинах квадрата со стороной  $a$  расположены одинаковые по модулю точечные заряды  $q$ . Определите напряженность поля в центре квадрата, если: а) все заряды положительные; б) один из зарядов отрицательный.
6. Два точечных заряда  $+q$  и  $-q$  расположены на расстоянии  $a$  друг от друга (см. рисунок). Найдите напряженность поля в точке  $A$ , которая делит отрезок, соединяющий заряды, пополам; напряженность поля в точках  $B$  и  $C$ .



## § 42. РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОТЕНЦИАЛ



В повседневной жизни мы довольно часто, особенно в сухую погоду, встречаемся с ситуацией, когда, коснувшись какого-либо тела, чувствуем неприятный удар. Как показывает опыт, таких сюрпризов можно ожидать от тел, имеющих высокий потенциал. Именно с понятием потенциала вы ознакомитесь в данном параграфе.

### 1 Работа по перемещению заряда в однородном электростатическом поле

Если электростатическое поле действует с некоторой силой на электрически заряженные тела, то оно способно совершить работу по перемещению этих тел.

Пусть в однородном электростатическом поле напряженностью  $\vec{E}$  положительный точечный заряд  $q$  перемещается из точки 1 с координатой  $x_1$  в точку 2 с координатой  $x_2$  (рис. 42.1).

Вычислим работу  $A$ , которую совершает сила  $\vec{F}$ , действующая на заряд со стороны электростатического поля. По определению работы:  $A = F s \cos \alpha$ .

Поле однородное, поэтому сила  $\vec{F}$  постоянна, ее модуль равен:  $F = qE$ , а  $s \cos \alpha = d = x_2 - x_1$  является проекцией вектора перемещения на направление силовых линий поля. Следовательно, работа сил однородного электростатического поля по перемещению электрического заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 ( $A_{1 \rightarrow 2}$ ) равна:

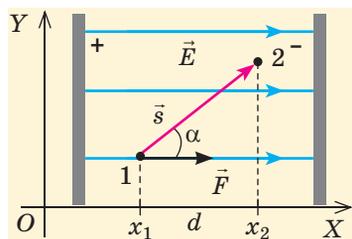
$$A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1), \text{ или } A_{1 \rightarrow 2} = qEd$$

**Обратите внимание!** Если бы в данном случае заряд перемещался не из точки 1 в точку 2, а наоборот, то знак работы изменился бы на противоположный, то есть работа совершалась бы против сил поля.

**?** Какой результат был бы получен, если бы из точки 1 в точку 2 перемещался не положительный, а отрицательный заряд?

### 2 Потенциальная энергия заряженного тела в поле, созданном точечным зарядом

Заряженное тело, помещенное в электростатическое поле, как и тело, находящееся в гравитационном поле Земли, обладает потенциальной



**Рис. 42.1.** К вычислению работы силы однородного электростатического поля

*Обратите внимание!*  
Формула  $A_{1 \rightarrow 2} = qE(x_2 - x_1)$  будет справедлива в случаях движения заряда по любой траектории. То есть однородное электростатическое поле является **потенциальным**. Потенциальным является любое электростатическое поле: работа электростатических (кулоновских) сил (как и работа гравитационных сил) не зависит от формы траектории, по которой перемещается заряд, а определяется начальным и конечным положениями заряда. Если траектория движения заряда замкнута, работа сил поля равна нулю.

энергией. Потенциальную энергию заряда, находящегося в электрическом поле, обычно обозначают символом  $W_p$ . Согласно теореме о потенциальной энергии изменение потенциальной энергии заряда, взятое с противоположным знаком, равно работе, которую совершает электростатическое поле по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 поля:

$$-\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = A_{1 \rightarrow 2}$$

Потенциальную энергию взаимодействия двух точечных зарядов  $Q$  и  $q$ , расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга, определяют по формуле:

$$W_p = k \frac{Qq}{r}$$

Обратите внимание: 1) потенциальная энергия взаимодействия зарядов положительна ( $W_p > 0$ ), если заряды одноименные, и отрицательна ( $W_p < 0$ ), если заряды разноименные; 2) если заряды бесконечно отдалить друг от друга ( $r \rightarrow \infty$ ), то  $W_p = 0$  (заряды не будут взаимодействовать).

Таким образом, потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов равна работе, которую должно совершить электростатическое поле для увеличения расстояния между этими зарядами от  $r$  до бесконечности.

### 3 Что называют потенциалом электростатического поля

**Потенциал**  $\varphi$  электростатического поля в данной точке — это скалярная физическая величина, которая характеризует энергетические свойства поля и равна отношению потенциальной энергии  $W_p$  электрического заряда, помещенного в данную точку поля, к значению  $q$  этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Единица потенциала в СИ — вольт:  $[\varphi] = 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \left( 1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right)$ .

Из определения потенциала следует, что потенциал  $\varphi$  поля, созданного точечным зарядом  $Q$ , в точках, которые расположены на расстоянии  $r$  от данного заряда, можно рассчитать по формуле:

$\varphi = k \frac{Q}{r}$  (\*).

Из формулы (\*) видно: 1) если поле создано положительным точечным зарядом ( $Q > 0$ ), то потенциал этого поля в любой точке является положительным ( $\varphi > 0$ ); 2) если поле создано отрицательным точечным зарядом ( $Q < 0$ ), то потенциал этого поля в любой точке является отрицательным ( $\varphi < 0$ ). Формула (\*) справедлива и для потенциала поля равномерно заряженной сферы (или шара) на расстояниях, которые больше ее радиуса или равны ему.

Если поле создано несколькими произвольно расположенными зарядами, потенциал  $\varphi$  поля в любой точке данного поля равен алгебраической сумме потенциалов  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  полей, созданных каждым зарядом:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$$

#### 4 Как определяют разность потенциалов

Когда в электростатическом поле заряд движется из точки 1 в точку 2, это поле совершает работу, которая равна изменению потенциальной энергии заряда, взятому с противоположным знаком:  $A_{1 \rightarrow 2} = W_{p1} - W_{p2}$ . Поскольку  $W_p = q\varphi$ , то  $A_{1 \rightarrow 2} = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Выражение  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  называют *разностью потенциалов*, где  $\varphi_1$  — значение потенциала в начальной точке траектории движения заряда,  $\varphi_2$  — значение потенциала в ее конечной точке.

**Разность потенциалов** — скалярная физическая величина, равная отношению работы сил электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к значению этого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$$

Единица разности потенциалов в СИ — **вольт**:  $[\varphi_1 - \varphi_2] = 1 \text{ В (V)}$ .

Разность потенциалов между двумя точками поля равна 1 В, если для перемещения между ними заряда 1 Кл электростатическое поле совершает работу 1 Дж.

Обратите внимание: в подобных случаях разность потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  также называют *напряжением (U)*. Важно не путать изменение потенциала  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  и разность потенциалов (напряжение)  $\varphi_1 - \varphi_2$ .

#### 5 Как связаны напряженность однородного электростатического поля и разность потенциалов

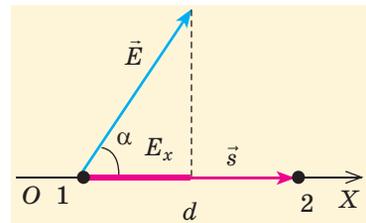
Рассмотрим *однородное* электростатическое поле на участке между точками 1 и 2, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга; пусть из точки 1 в точку 2 под действием поля перемещается заряд  $q$  (рис. 42.2). Совершаемую полем работу можно найти двумя способами: 1) через разность потенциалов между точками 1 и 2:  $A_{1 \rightarrow 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ ; 2) через напряженность поля:  $A_{1 \rightarrow 2} = F \cos \alpha = qEd \cos \alpha = qE_x d$ , где  $E_x = E \cos \alpha$  — проекция вектора  $\vec{E}$  на ось  $OX$ , проведенную через точки 1 и 2.

Приравняв оба выражения для работы, получим:  $q(\varphi_1 - \varphi_2) = qE_x d$ , откуда:  $\varphi_1 - \varphi_2 = E_x d$ , или

$$E_x = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}.$$

Если заряд перемещается в направлении напряженности электрического поля ( $\vec{s} \uparrow \vec{E}$ ), последняя формула примет вид:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \text{ или } E = \frac{U}{d}$$



**Рис. 42.2.** К выводу формулы связи напряженности электростатического поля и разности потенциалов

**?** Из последней формулы следует *единица напряженности* в СИ — **вольт на метр**:

$$[E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right). \text{ Докажите, что } 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

## 6 Какие поверхности называют эквипотенциальными

Для визуализации электростатического поля кроме силовых линий используют также *эквипотенциальные поверхности*.

**Эквипотенциальная поверхность** — это поверхность, во всех точках которой потенциал электростатического поля имеет одинаковое значение.

Для наглядности следует рассматривать не одну эквипотенциальную поверхность, а их совокупность. Однако графически изобразить совокупность поверхностей сложно, поэтому обычно изображают только линии пересечения эквипотенциальных поверхностей некоторой плоскостью (рис. 42.3).

Эквипотенциальные поверхности тесно связаны с силовыми линиями электростатического поля. Если электрический заряд перемещается по эквипотенциальной поверхности, то работа поля равна нулю, поскольку  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ , а на эквипотенциальной поверхности  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

Работу электростатического поля также можно представить через силу  $\vec{F}$ , действующую на заряд со стороны поля:  $A = Fscos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{F}$  и  $\vec{s}$ . Поскольку  $A = 0$ , а  $F \neq 0$  и  $s \neq 0$ , то  $cos\alpha = 0$ , то есть  $\alpha = 90^\circ$ . Это означает, что при движении заряда вдоль эквипотенциальной поверхности вектор силы  $\vec{F}$ , а следовательно, и вектор напряженности  $\vec{E}$  поля в любой точке перпендикулярны вектору перемещения  $\vec{s}$ .

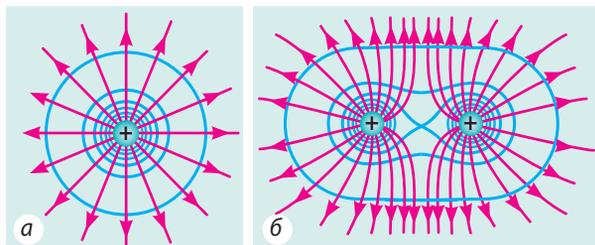
Таким образом, *силовые линии электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям* (см. рис. 42.3).

*Обратите внимание!* Симметрия эквипотенциальных поверхностей повторяет симметрию источников поля. Так, поле точечного заряда сферически симметрично, поэтому эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются концентрические сферы; при однородном поле эквипотенциальные поверхности — это система параллельных плоскостей.

## 7 Учимся решать задачи

**Задача.** Электрон, начав движение из состояния покоя, прошел ускоряющую разность потенциалов  $-300$  В. Какую скорость приобрел электрон? Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, заряд  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

*Анализ физической проблемы.* Заряд электрона — отрицательный, его начальная скорость  $v_0 = 0$ , поэтому под действием сил поля электрон будет двигаться в направлении, противоположном направлению силовых линий поля, то есть в направлении увеличения потенциала. Поле будет совершать положительную работу, в результате кинетическая энергия электрона и его скорость будут возрастать.



**Рис. 42.3.** Эквипотенциальные поверхности (синие линии) и силовые линии (красные линии) простых электростатических полей, созданных: а — положительным точечным зарядом; б — двумя равными по модулю положительными точечными зарядами

**Дано:**

$\varphi_1 - \varphi_2 = -300 \text{ В}$

$v_0 = 0$

$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

 $v = ?$ **Поиск математической модели, решение**

Согласно теореме о кинетической энергии:

$$A = \Delta W_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}, \text{ где } A = e(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ — работа сил поля.}$$

$$\text{Таким образом, } e(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mv^2}{2}, \text{ отсюда } v = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot (-300)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ (м/с)}.$$

**Ответ:**  $v \approx 1,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ .

### Подводим итоги

- Электростатическое поле является потенциальным. Работа этого поля по перемещению заряда между двумя точками не зависит от формы траектории и равна изменению потенциальной энергии заряда, взятому с противоположным знаком.

- Энергетическая характеристика электростатического поля — потенциал  $\varphi$ , который определяется отношением потенциальной энергии  $W_p$  заряда, помещенного в данную точку электростатического поля, к значению  $q$

этого заряда:  $\varphi = \frac{W_p}{q}$ . Единица потенциала в СИ — вольт:  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ .

- Потенциал поля, созданного в вакууме точечным зарядом  $Q$ , в точках, расположенных на расстоянии  $r$  от этого заряда:  $\varphi = k \frac{Q}{r}$ . Потенциал поля, созданного системой зарядов:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$ .

- Разность потенциалов между двумя точками ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) — скалярная физическая величина, равная отношению работы  $A_{1 \rightarrow 2}$  сил электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к значению  $q$  этого заряда:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q}$ . Напряженность однородного электростатического поля связана с разностью потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) соотношением  $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$ .



### Контрольные вопросы

1. Как определяют работу однородного электростатического поля по перемещению заряда в этом поле? Зависит ли она от формы траектории движения заряда?
2. Чему равна потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов?
3. Что называют потенциалом электростатического поля?
4. Как рассчитывают потенциал поля точечного заряда?
5. Что такое разность потенциалов?
6. Каково соотношение между напряженностью поля и разностью потенциалов для однородного электростатического поля?
7. Какие поверхности называют эквипотенциальными?
8. Как расположены линии напряженности поля относительно эквипотенциальных поверхностей?



### Упражнение № 42

1. Заряды  $q$  и  $2q$  расположены на расстоянии  $R$  друг от друга. Как изменится потенциальная энергия взаимодействия зарядов, если увеличить в 2 раза расстояние между зарядами? если увеличить в 2 раза значение каждого заряда?
2. В однородном электрическом поле напряженностью  $500 \text{ Н/Кл}$  переместили заряд  $q = -40 \text{ нКл}$  в направлении силовой линии поля на  $15 \text{ см}$ . Какую работу совершило поле? Как изменилась потенциальная энергия заряда?
3. Заряд  $2 \text{ мкКл}$  переместили из точки  $A$ , расположенной на расстоянии  $10 \text{ см}$  от точечного заряда  $Q = 5 \text{ мкКл}$ , в точку  $B$ , расположенную от заряда  $Q$  на расстоянии  $5 \text{ см}$ . Какую работу совершило поле? Будет ли эта работа зависеть от того, по какой траектории перемещали заряд?
4. В электростатическом поле из точки с потенциалом  $450 \text{ В}$  в точку с потенциалом  $900 \text{ В}$  движется отрицательно заряженная частица. Поле совершает при этом работу  $1,8 \text{ мкДж}$ . Определите модуль заряда частицы.
5. Электрон, двигаясь со скоростью  $3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , влетает в электрическое поле. Определите разность потенциалов, которую необходимо пройти электрону, чтобы скорость его движения уменьшилась до  $1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ .

### Экспериментальное задание

Вы знаете, как опасно касаться провода под напряжением. Но известно много случаев, когда человек или животное погибали, всего лишь оказавшись рядом с оборванным проводом. Выполнив экспериментальное задание, вы поймете, как избежать таких ситуаций. Вам понадобятся: два изолированных толстых провода длиной  $10\text{--}15 \text{ см}$  и один такой провод длиной  $20\text{--}25 \text{ см}$ , светодиод, источник постоянного тока ( $40 \text{ В}$ ), две емкости — с влажным и сухим песком.



1. Зачистите концы двух коротких проводов и сделайте фигурку (см. рисунок).
2. Соедините «руки» со светодиодом, «ноги» погрузите во влажный песок.
3. Один конец длинного провода присоедините к положительному полюсу источника постоянного тока, второй конец погрузите в песок.

Включите источник тока и, наблюдая за свечением светодиода, выполните ряд экспериментов: поместите фигурку сначала ближе к месту погружения провода в песок, затем дальше; поставьте «ступни» фигурки почти вплотную друг к другу, затем увеличьте расстояние между «ступнями»; «обуйте» фигурку; погрузите «ступни» фигурки в сухой песок. Сделайте выводы.

### Физика и техника в Украине



**Национальный университет «Львовская политехника»** — старейший университет Восточной Европы (основан в 1816 г.). За свою 200-летнюю историю университет подготовил более 250 000 специалистов, а каждый 12-й львовянин является его выпускником.

В университете сформировались научные школы по направлениям: математика, теоретическая и прикладная механика, радиотехника, электротехника, астрономия, геодезия, приборостроение, измерительная техника, наноматериалы и нанотехнологии, энерго- и ресурсосберегающие технологии, перспективные компьютерные системы и информационные технологии.

## § 43. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ



Проводя аналогии между гравитационным и электростатическим взаимодействиями, мы находили общие для них свойства. Однако между ними есть и существенные отличия. Одно из них — всепроникаемость гравитационного поля. Действительно, убежище от силы притяжения построить невозможно. А вот от действия сил электростатического поля можно спрятаться достаточно надежно, построив защиту из проводника. Выясним, почему это возможно.

### 1 Какковы особенности внутреннего строения проводников

Любое вещество состоит из молекул, атомов или ионов, которые, в свою очередь, содержат заряженные частицы. Поэтому, если вещество поместить в электрическое поле, это вызовет в веществе определенные изменения, зависящие от свойств самого вещества. В зависимости от электрических свойств вещества делят на *проводники, диэлектрики, полупроводники*.

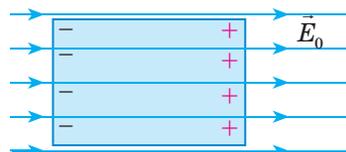
**Проводники** — это вещества, способные проводить электрический ток. Любой проводник содержит заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться внутри проводника. Типичные представители проводников — металлы. Внутренняя структура металлов представляет собой кристаллическую решетку, образованную положительно заряженными ионами и находящуюся в «газе» свободных электронов. Проводниками также являются электролиты, а при некоторых условиях — и газы. В электролитах свободные заряженные частицы — это положительные и отрицательные ионы, а в газах еще и электроны.

### 2 Электростатические свойства проводников

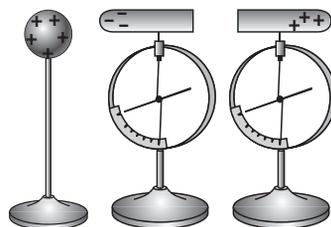
**Свойство 1.** Напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю.

Поместим металлический проводник в электростатическое поле (рис. 43.1). Под действием поля движение свободных электронов станет направленным. Если поле не слишком велико, то электроны не могут оставить проводник и накапливаются в определенной области его поверхности — эта область приобретает отрицательный заряд, а противоположная область — положительный (его создают оставшиеся там положительные ионы). Таким образом, на поверхности проводника появляются *наведенные (индуцированные)* электрические заряды, при этом суммарный заряд проводника остается неизменным (рис. 43.2).

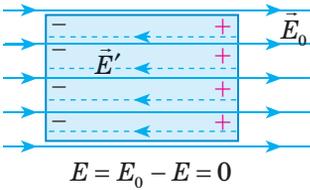
Явление перераспределения электрических зарядов в проводнике, помещенном в электростатическое поле, называют **явлением электростатической индукции**.



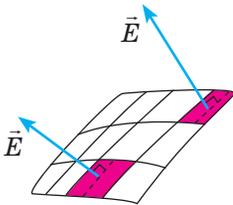
**Рис. 43.1.** Внешнее электростатическое поле индуцирует на поверхности проводника заряды противоположных знаков



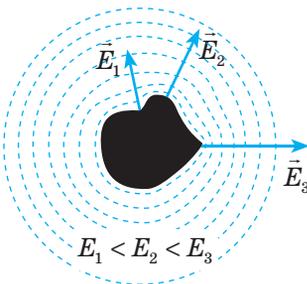
**Рис. 43.2.** Если два контактирующих друг с другом металлических цилиндра разъединить при наличии рядом заряженного шара, то каждый цилиндр окажется заряженным



**Рис. 43.3.** Перераспределение зарядов в проводнике происходит до тех пор, пока модуль напряженности  $\vec{E}'$  поля индуцированных зарядов не будет равен модулю напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля



**Рис. 43.4.** В любой точке поверхности проводника напряженность  $\vec{E}$  электрического поля направлена перпендикулярно этой поверхности



**Рис. 43.5.** Напряженность электростатического поля проводника больше на выступах проводника и меньше в его впадинах

Заряды, индуцированные на поверхности проводника, создают собственное электрическое поле, направленное противоположно *внешнему полю* (рис. 43.3). Процесс перераспределения зарядов будет продолжаться до момента, когда поле внутри проводника, создаваемое индуцированными зарядами, полностью компенсирует внешнее поле. За очень малый интервал времени *напряженность  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  результирующего поля внутри проводника станет равной нулю.*

**?** Почему в данном случае результирующее поле внутри проводника не может не скомпенсироваться?

**Свойство 2.** *Поверхность проводника эквипотенциальна.* Это утверждение является прямым следствием связи между напряженностью поля и разностью потенциалов:  $E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}$ . Если напряженность поля внутри проводника равна нулю, то разность потенциалов тоже равна нулю, поэтому потенциалы во всех точках проводника одинаковы.

**Свойство 3.** *Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности.* Данное свойство является следствием закона Кулона и свойства одноименных зарядов отталкиваться.

**Свойство 4.** *Вектор напряженности электростатического поля перпендикулярен поверхности проводника* (рис. 43.4). Докажем свойство 4 методом от противного. Предположим, что в определенной точке поверхности проводника вектор  $\vec{E}$  напряженности электростатического поля направлен под некоторым углом к поверхности проводника. Разложим этот вектор на две составляющие: нормальную  $\vec{E}_n$ , перпендикулярную поверхности, и тангенциальную  $\vec{E}_\tau$ , направленную по касательной к поверхности. Понятно, что в результате действия  $\vec{E}_\tau$  электроны будут направлены двигаться по поверхности проводника, но это означает, что по данной поверхности течет электрический ток, а это, в свою очередь, противоречит закону сохранения энергии, следовательно:  $\vec{E}_\tau = 0$ , поскольку  $\vec{E} = \vec{E}_n$ .

**Свойство 5.** *Электрические заряды распределяются по поверхности проводника так, что напряженность электростатического поля проводника оказывается больше на выступах проводника и меньше в его впадинах* (рис. 43.5).

### 3 Как применяют электростатические свойства проводников

Приведем примеры использования рассмотренных электростатических свойств проводников.

**Электростатическая защита.** Иногда возникает необходимость изолировать приборы от влияния внешних электрических полей. Очевидно, что для этого их необходимо поместить внутрь металлического корпуса, поскольку внешнее электрическое поле вызывает появление индуцированных зарядов только на поверхности проводника, а поле внутри проводника отсутствует (рис. 43.6). Аналогичный эффект достигается, если сплошную проводящую оболочку заменить металлической сеткой с мелкими ячейками.

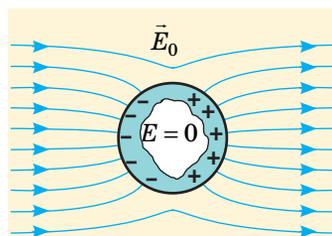
**Заземление.** Чтобы разрядить небольшое заряженное тело, его необходимо соединить проводником с телом больших размеров: *на теле больших размеров накапливается большой электрический заряд*. Чтобы обосновать это утверждение, рассмотрим два соединенных проводником проводящих шара радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , расположенные друг от друга на большом (по сравнению с их радиусами) расстоянии  $l$  (рис. 43.7). Электрический заряд  $Q$ , переданный системе, распределится между шарами таким образом, что их потенциалы будут равными ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ). Расстояние между шарами значительно больше их радиусов, поэтому, рассчитывая потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  шаров, взаимным влиянием их полей можно пренебречь и воспользоваться формулой для определения потенциала шара:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R_1}; \quad \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_2}.$$

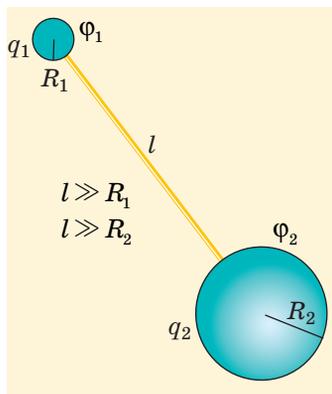
Поскольку  $\varphi_1 = \varphi_2$ , получим, что заряды шаров прямо пропорциональны их радиусам:  $\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_1}{R_2}$ .

**Обратите внимание!** Если один из заряженных шаров значительно больше другого, после их соединения практически весь заряд окажется на большем шаре. Этот вывод справедлив и для проводящих тел произвольной формы. Так, если коснуться рукой кондуктора заряженного электроскопа, заряд перераспределится между кондуктором и телом человека, а поскольку человек значительно больше кондуктора, почти весь заряд перейдет на человека.

Часто в качестве тела больших размеров используют весь земной шар: приборы, на которых не должен скапливаться электрический заряд, «заземляют» — присоединяют к массивному проводнику, закопанному в землю.



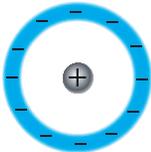
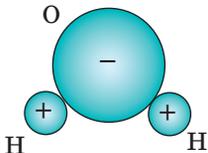
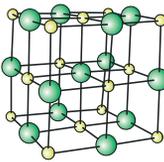
**Рис. 43.6.** Электростатическая защита. Под действием внешнего поля на поверхности металлического корпуса возникают индуцированные заряды, поле которых экранирует внешнее электрическое поле: напряженность поля внутри корпуса становится равной нулю



**Рис. 43.7.** Заряд  $Q$ , переданный системе из двух шаров, соединенных проводником, распределится между шарами так, что их потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  будут равными

#### 4 Каковы особенности внутреннего строения диэлектриков

*Диэлектрики* — это вещества, плохо проводящие электрический ток: при обычных условиях в них практически нет зарядов, которые могут свободно передвигаться. Обычно выделяют следующие три группы диэлектриков.

Неполярные диэлектрики	Полярные диэлектрики	Ионные диэлектрики
<p>Вещества, молекулы (атомы) которых неполярные: при отсутствии внешнего электростатического поля центры распределения положительных и отрицательных зарядов, из которых состоит молекула (атом), совпадают.</p>  <p>Типичными примерами таких веществ являются одноатомные газы; газы, состоящие из симметричных двухатомных молекул; некоторые органические жидкости; пластмассы.</p>	<p>Вещества, молекулы которых полярные: при отсутствии внешнего электростатического поля центры распределения положительных и отрицательных зарядов в молекуле не совпадают, то есть электронные облака смещены к одному из атомов.</p>  <p>Примером полярного диэлектрика является вода (<math>H_2O</math>). Молекулы воды, как и молекулы других полярных диэлектриков, представляют собой микроскопические электрические диполи.</p>	<p>Вещества, имеющие ионную структуру. Среди них — соли и щелочи, например хлорид натрия (<math>NaCl</math>). Кристаллические решетки многих ионных диэлектриков можно рассматривать как состоящие из двух вставленных друг в друга подрешеток, каждая из которых образована ионами одного знака. При отсутствии внешнего поля каждая ячейка кристалла в целом электронейтральна.</p> 

#### 5 Как электростатическое поле влияет на диэлектрик

Внесение диэлектрика во внешнее электростатическое поле вызывает *поляризацию диэлектрика*. В процессе поляризации *неполярных* диэлектриков проявляется *электронный (деформационный) механизм*. Под действием внешнего электрического поля молекулы неполярных диэлектриков поляризуются: положительные заряды смещаются в направлении вектора напряженности  $\vec{E}_0$  этого поля, а отрицательные — в противоположном направлении (рис. 43.8, а). В результате молекулы превращаются в электрические диполи, расположенные вдоль силовых линий внешнего поля. В итоге на поверхностях  $AB$  и  $CD$  появляются нескомпенсированные связанные заряды противоположных знаков, образующие свое поле, напряженность  $\vec{E}'$  которого направлена навстречу напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля (рис. 43.8, б). В процессе поляризации *полярных диэлектриков* возникает *ориентационная*

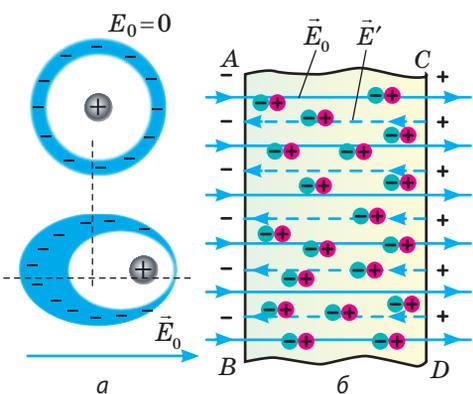
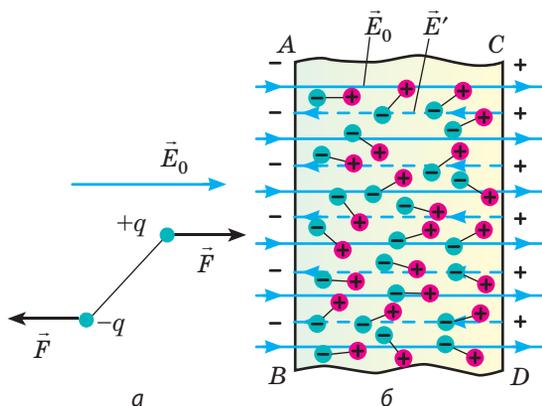


Рис. 43.8. Неполярный диэлектрик в электростатическом поле напряженностью  $\vec{E}_0$

поляризации *полярных диэлектриков* возникает *ориентационная*

*поляризация.* Под действием внешнего электрического поля дипольные молекулы диэлектрика пытаются повернуться так, чтобы их оси были расположены вдоль силовых линий поля. Однако этому процессу препятствует тепловое движение молекул, и возникает лишь частичное упорядочение дипольных молекул (рис. 43.9). Упорядоченность в расположении молекул вызывает появление на поверхностях *AB* и *CD* нескомпенсированных связанных зарядов противоположных знаков. Эти заряды образуют свое поле напряженностью  $\vec{E}'$ , которая направлена противоположно напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля. Заметим, что в полярных диэлектриках имеется и *электронный механизм поляризации*, то есть в результате действия электрического поля происходит смещение зарядов в молекулах. Однако эффект ориентации на несколько порядков превосходит электронный эффект, поэтому последним часто пренебрегают.



**Рис. 43.9.** Полярный диэлектрик в электростатическом поле напряженностью  $\vec{E}_0$

При поляризации *ионных диэлектриков* наблюдается *ионная поляризация*. Под действием внешнего поля ионы разных знаков, составляющие две подрешетки, смещаются в противоположных направлениях, и в результате на гранях кристалла появляются нескомпенсированные связанные заряды, то есть кристалл поляризуется. Следует подчеркнуть, что ионная поляризация в чистом виде не наблюдается, — ее всегда сопровождает электронная поляризация.

### 6 Как диэлектрик влияет на электростатическое поле

Рассматривая механизмы поляризации диэлектриков, вы узнали, что внесение диэлектрика во внешнее электростатическое поле вызывает появление на его поверхности связанных зарядов. Связанные заряды создают электрическое поле напряженностью  $\vec{E}'$ , которая внутри диэлектрика направлена противоположно напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля. В результате напряженность  $\vec{E}$  результирующего поля внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше, чем напряженность  $\vec{E}_0$  внешнего поля:  $E = E_0 - E'$ .

Уменьшение модуля напряженности  $\vec{E}$  электростатического поля в веществе по сравнению с модулем напряженности  $\vec{E}_0$  электростатического поля в вакууме характеризуется физической величиной, которую называют **диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  вещества:**

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Диэлектрические проницаемости различных веществ могут отличаться в десятки раз. Так, диэлектрическая проницаемость газов близка к единице,

жидких и твердых неполярных диэлектриков — к нескольким единицам, полярных диэлектриков — к нескольким десяткам единиц (для воды  $\epsilon = 81$ ). Есть вещества (их называют *сегнетоэлектриками*), диэлектрическая проницаемость которых составляет значение порядка десятков и сотен тысяч.

Уменьшение напряженности электрического поля в диэлектрике в  $\epsilon$  раз по сравнению с напряженностью поля в вакууме приводит к уменьшению силы электростатического взаимодействия. Поэтому закон Кулона для случая взаимодействия двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , расположенных в диэлектрике на расстоянии  $r$  друг от друга, имеет вид: 
$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Так же изменяются формулы для определения потенциала  $\phi$  и модуля напряженности  $E$  поля, созданного точечным зарядом  $Q$ , расположенным в диэлектрике:  $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$ ,  $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$ , где  $r$  — расстояние от заряда до точки, в которой определяется напряженность или потенциал поля.

-  Сформулируйте итоги § 43 самостоятельно. Попробуйте использовать не более 150–200 слов.

### Контрольные вопросы



1. Какие вещества называют проводниками? 2. Что такое электростатическая индукция? 3. Назовите основные электростатические свойства проводников.
4. Как защищают оборудование и приборы от воздействия электрического поля? 5. Зачем применяют заземление? 6. Какие вещества называют диэлектриками? Приведите примеры. 7. Чем отличаются полярные диэлектрики от неполярных? 8. Что называют поляризацией диэлектрика? Каковы ее механизмы? 9. Что характеризует диэлектрическая проницаемость вещества?



### Упражнение № 43

1. Почему незаряженные тела притягиваются к заряженным телам?
2. К кондуктору заряженного электрометра подносят (не касаясь его) незаряженное проводящее тело. Как и почему изменится отклонение стрелки электрометра? Ответ проверьте экспериментально.
3. Изменятся ли результаты опыта, представленного на рис. 43.2, если цилиндры будут изготовлены из диэлектрика? Ответ обоснуйте.
4. Незаряженная гильза из фольги висит на шелковой нити. К ней приближают заряженную палочку. Опишите и объясните дальнейшее «поведение» гильзы.
5. Над кондуктором заряженного электрометра расположили незаряженную пластину из оргстекла. Как изменится отклонение стрелки электрометра?
6. Два маленьких шарика, заряды которых одинаковы по модулю, находясь в трансформаторном масле на расстоянии 50 см друг от друга, взаимодействуют с силой 2,2 мН. Определите модуль заряда каждого шарика. Диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла — 2,2.
7. Заряженный металлический шарик массой 40 г и объемом 4,2 см<sup>3</sup> лежит на дне сосуда с жидкостью. После того как систему поместили в однородное электростатическое поле напряженностью 4,0 МВ/м, шарик всплыл. Найдите минимальный заряд шарика. Плотность жидкости — 800 кг/м<sup>3</sup>, диэлектрическая проницаемость — 5.
8. Какое устройство изображено на фото, представленном в начале § 43? Кто, когда и для чего сконструировал это устройство?



## § 44. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА



То, что деньги хранят в банках, знает даже первоклассник. А вот где хранят заряды? И зачем вообще хранить заряды? Ответы вы найдете в данном параграфе.

### 1 Что такое емкость

Емкость характеризует способность проводника или системы проводников накапливать электрический заряд. Различают емкость уединенного проводника и емкость системы проводников (например, конденсатора). Уединенным называют проводник, расположенный вдали от других тел так, что они не оказывают на этот проводник никакого влияния.

**Емкость уединенного проводника ( $C$ )** — физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать заряд и равная отношению электрического заряда  $q$  проводника к его потенциалу  $\varphi$ :

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Единица емкости в СИ — фарад:  $[C] = 1 \text{ Ф}$  (названа в честь М. Фарадея). 1 Ф — это емкость такого проводника, потенциал которого равен 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл;  $1 \text{ Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}$  ( $1 \text{ Ф} = 1 \frac{\text{С}}{\text{В}}$ ).

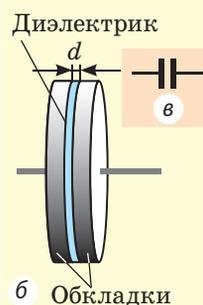
1 Ф — очень большая единица емкости, поэтому используют доли единицы:  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ;  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ .

### 2 Что такое конденсатор

**Конденсатор** — устройство, представляющее собой систему из двух проводящих обкладок, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 44.1).

Обкладкам конденсатора передают одинаковые по модулю, но противоположные по знаку заряды, что способствует накоплению зарядов: разноименные заряды притягиваются, а значит, располагаются на внутренних поверхностях обкладок.

Обычно для зарядки конденсатора обе его обкладки соединяют с полюсами батареи аккумуляторов: на обкладках появляются равные по модулю, но противоположные по знаку заряды. Результат не изменится, если соединить с полюсом батареи только одну обкладку, заземлив вторую: вследствие электростатической индукции на заземленной обкладке тоже появится заряд, равный по модулю заряду на другой обкладке, но имеющий противоположный знак.



**Рис. 44.1.** Школьный воздушный конденсатор: а — вид; б — устройство; в — обозначение на схемах

*Зарядом конденсатора называют модуль заряда одной из его обкладок.* Отношение заряда  $q$  данного конденсатора к разности потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  между его обкладками не зависит ни от значения  $q$ , ни от разности потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ , а значит, может служить характеристикой конденсатора. Такую характеристику называют **электроемкостью (емкостью) конденсатора**:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}, \text{ или } C = \frac{q}{U},$$

где  $U$  — напряжение между обкладками:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Как показывают исследования, емкость конденсатора увеличится, если увеличить площадь поверхности обкладок или приблизить обкладки друг к другу. На емкость конденсатора влияет также диэлектрик: чем больше его диэлектрическая проницаемость, тем большую емкость имеет конденсатор.

Конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин (обкладок), разделенных слоем диэлектрика, называют *плоским* (см. рис. 44.1). *Электроемкость плоского конденсатора* вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $S$  — площадь пластины конденсатора;  $d$  — расстояние между пластинами.

*Поле между пластинами плоского конденсатора однородно*, поэтому напряженность  $E$  поля связана с напряжением  $U$  на конденсаторе формулой  $U = Ed$ .

### 3 Как рассчитывают электроемкость батареи конденсаторов

Конденсаторы характеризуются *емкостью* и *максимальным рабочим напряжением*  $U_{\max}$ . Если напряжение, поданное на конденсатор, значительно превысит  $U_{\max}$ , произойдет *пробой* — между обкладками возникнет искра, которая разрушит изоляцию. Чтобы получить необходимую электроемкость при определенном рабочем напряжении, конденсаторы соединяют в батареи, применяя *параллельное, последовательное* и *смешанное соединения*.

Рассмотрим батарею из трех конденсаторов электроемкостями  $C_1, C_2, C_3$ .

При *параллельном соединении* конденсаторов положительно заряженные обкладки всех конденсаторов соединяют в один узел, а отрицательно заряженные — в другой узел (рис. 44.2). В таком случае *общий заряд  $q$  батареи конденсаторов равен алгебраической сумме зарядов отдельных конденсаторов*:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

Соединенные в один узел обкладки представляют собой один проводник, поэтому потенциалы обкладок, а следовательно, и *разность потенциалов (напряжение) между обкладками всех конденсаторов одинаковы*:

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Таким образом, при параллельном соединении конденсаторов допустимое рабочее напряжение батареи определяется рабочим напряжением одного конденсатора.

Поскольку  $q = CU$ ,  $q_1 = C_1U$ ,  $q_2 = C_2U$ ,  $q_3 = C_3U$ , то  $CU = C_1U + C_2U + C_3U$ , следовательно, *электроемкость батареи из трех параллельно соединенных конденсаторов равна:*

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

При *последовательном соединении* конденсаторы соединяют друг с другом разноименно заряженными обкладками (рис. 44.3). В этом случае *заряды всех конденсаторов будут одинаковы и равны заряду батареи:*

$$q = q_1 = q_2 = q_3$$

*Напряжение на батарее* последовательно соединенных конденсаторов *равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:*

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Таким образом, допустимое рабочее напряжение батареи последовательно соединенных конденсаторов больше допустимого рабочего напряжения отдельного конденсатора.

*Электроемкость батареи последовательно соединенных конденсаторов вычисляют по формуле:*

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

**?** Получите последнюю формулу самостоятельно.

При последовательном соединении конденсаторов емкость батареи меньше, чем емкость конденсатора с минимальной емкостью.

Приведенные соотношения можно обобщить для любого количества конденсаторов.

#### 4 Энергия заряженного конденсатора

Заряженный конденсатор, как и любая другая система заряженных тел, обладает энергией.

Убедимся в этом с помощью простого эксперимента. Присоединим к обкладкам заряженного конденсатора лампочку. Замкнем ключ — лампочка загорится. Теперь измерим напряжение на обкладках конденсатора — оно равно нулю, то есть конденсатор разрядился, а это означает, что заряженный конденсатор обладал энергией, которая частично превратилась в энергию света.

Вычислим энергию заряженного до напряжения  $U_0$  конденсатора емкостью  $C$ , на котором накоплен заряд  $q_0$ . Эту энергию точнее было бы назвать энергией электростатического поля, которое существует между обкладками заряженного конденсатора, поскольку энергия любых заряженных тел

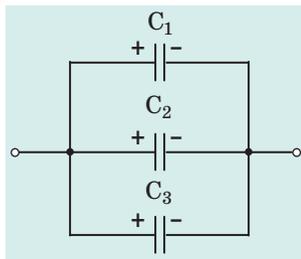


Рис. 44.2. Батарея из трех параллельно соединенных конденсаторов

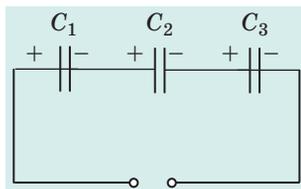


Рис. 44.3. Батарея из трех последовательно соединенных конденсаторов

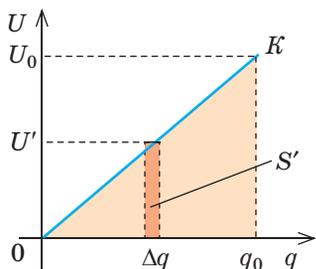
*Обратите внимание!*

- Если батарея содержит  $n$  параллельно соединенных конденсаторов электроемкостью  $C'$  каждый, то:

$$C = nC'$$

- Если батарея содержит  $n$  последовательно соединенных конденсаторов электроемкостью  $C'$  каждый, то:

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{C'}, \text{ или } C = \frac{C'}{n}$$



**Рис. 44.4.** К определению работы, которую совершает электрическое поле заряженного конденсатора при его разрядке

сосредоточена в электрическом поле, создаваемом этими телами.

При разрядке конденсатора напряжение  $U$  на его обкладках изменяется прямо пропорционально заряду  $q$  конденсатора:  $C = \frac{q}{U} \Rightarrow U = \frac{1}{C}q$ , поэтому график зависимости  $U(q)$  имеет вид, представленный на рис. 44.4. Мысленно разделим весь заряд конденсатора на маленькие «порции»  $\Delta q$  и будем считать, что при потере каждой такой «порции» напряжение на конденсаторе не изменяется. Таким образом получим ряд полос. Площадь  $S'$  каждой полосы равна произведению двух ее сторон:  $S' = \Delta q U' = A'$ , где  $U'$  — напряжение, при котором конденсатор терял данную «порцию» за

ряда  $\Delta q$ ;  $A'$  — работа, которую совершило поле при потере конденсатором заряда  $\Delta q$ . Полная работа, которую совершило поле при уменьшении заряда конденсатора от  $q_0$  до 0, определяется площадью выделенного на рис. 44.4 тре-

угольника. Следовательно,  $A = \frac{q_0 U_0}{2}$ . Учитывая, что  $q_0 = CU_0$ , получим:

$A = \frac{CU_0^2}{2}$ , или  $A = \frac{q_0^2}{2C}$ . С другой стороны, данная работа равна уменьшению энергии электрического поля конденсатора от  $W_p$  до нуля:  $A = W_p - 0 = W_p$ .

Таким образом, энергия  $W_p$  заряженного до напряжения  $U$  конденсатора, имеющего емкость  $C$  и заряд  $q$ , равна:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

## 5 Для чего нужны конденсаторы

В современной технике сложно найти отрасль, где не применялись бы конденсаторы. Без них не обходятся радио- и телеаппаратура (настройка колебательных контуров), радиолокационная и лазерная техника (получение мощных импульсов), телефония и телеграфия (разделение цепей переменного и постоянного токов, тушение искр в контактах), электроизмерительная техника (создание образцов емкости). И это далеко не полный перечень.

В современной электроэнергетике конденсаторы тоже имеют широкое применение: они присутствуют в конструкциях люминесцентных светильников, электросварочных аппаратов, устройств защиты от перенапряжений. Конденсаторы применяют и в других, не электротехнических, областях техники и промышленности (в медицине, фототехнике и т. д.).

Разнообразие областей применения обуславливает большое разнообразие конденсаторов. Наряду с миниатюрными конденсаторами, имеющими массу меньше грамма, а размеры порядка нескольких миллиметров, существуют конденсаторы массой несколько тонн и высотой больше человеческого роста. Емкость современных конденсаторов может составлять от долей

пикофард до сотен миллифард, а рабочее напряжение может быть в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт. Конденсаторы можно классифицировать по следующим признакам и свойствам:

- по назначению — постоянной и переменной емкости;
- по форме обкладок — плоские, сферические, цилиндрические и др.;
- по типу диэлектрика — воздушные, бумажные, слюдяные, керамические, электролитические и др.



### Подводим итоги

- Электроемкость  $C$  уединенного проводника равна отношению электрического заряда  $q$  проводника к его потенциалу  $\varphi$ :  $C = \frac{q}{\varphi}$ . Единица электроемкости в СИ — фарад (Ф).

- Электроемкость конденсатора, имеющего заряд  $q$  и напряжение между обкладками  $U$ , равна:  $C = \frac{q}{U}$ .

- Электроемкость плоского конденсатора находят по формуле  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ .
- Для получения необходимой емкости конденсаторы соединяют в батареи.

Физическая величина	Вид соединения конденсаторов	
	последовательное	параллельное
Заряд	$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$	$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$
Напряжение	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$
Электроемкость	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

- Энергию заряженного конденсатора можно вычислить по формулам:

$$W_p = \frac{CU^2}{2}; \quad W_p = \frac{q^2}{2C}; \quad W_p = \frac{qU}{2}.$$

- Конденсаторы классифицируют по назначению (постоянной и переменной емкости); по форме обкладок (плоские, сферические, цилиндрические и др.); по типу диэлектрика (воздушные, бумажные, слюдяные, керамические, электролитические и др.).



### Контрольные вопросы

1. Что называют электроемкостью уединенного проводника? Какова ее единица?
2. Что такое конденсатор? Для чего он предназначен?
3. Для чего пространство между обкладками конденсатора заполняют диэлектриком?
4. От чего зависит электроемкость конденсатора?
5. По какой формуле рассчитывают электроемкость плоского конденсатора?
6. Как вычислить электроемкость батареи, которая состоит из конденсаторов, соединенных последовательно? соединенных параллельно?
7. С помощью каких формул рассчитывают энергию заряженного конденсатора?
8. Назовите области применения конденсаторов. Приведите примеры.
9. Какие типы конденсаторов вам известны?



### Упражнение № 44

1. Напряжение между обкладками плоского конденсатора — 12 В. Заряд конденсатора — 60 мкКл. Какова емкость конденсатора? Чему равна его энергия? Как изменится энергия конденсатора, если, не изменяя напряжения между его обкладками, в 2 раза увеличить расстояние между ними?
2. Четыре одинаковых конденсатора соединены в одном случае параллельно, а во втором — последовательно. В каком случае емкость батареи больше?
3. Определите емкость батарей конденсаторов (рис. 1). Емкость каждого конденсатора равна  $C$ .
4. Плоский воздушный конденсатор зарядили и, отключив от источника напряжения, погрузили в керосин. Как изменится энергия конденсатора? Диэлектрическая проницаемость керосина — 2,1.  
*Если конденсатор отключен от источника напряжения, то заряд конденсатора не изменяется, если подключен — не изменяется напряжение.*
5. Два конденсатора емкостями 1 и 2 мкФ соединены последовательно и присоединены к источнику, напряжение на выходе которого — 120 В. Найдите напряжение между обкладками первого конденсатора; второго конденсатора.
6. Конденсатор, заряженный до напряжения 100 В, соединили параллельно с конденсатором такой же емкости, но заряженным до 200 В. Какое напряжение установится между обкладками конденсаторов?
7. Расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора увеличили от 5 до 12 мм. На сколько изменилась энергия конденсатора, если напряжение на конденсаторе 180 В? Площадь пластины — 174 см<sup>2</sup>.
8. Между клеммами  $A$  и  $B$  присоединены конденсаторы емкостями  $C_1 = 2$  мкФ и  $C_2 = 1$  мкФ (рис. 2). Вычислите емкость батареи конденсаторов.

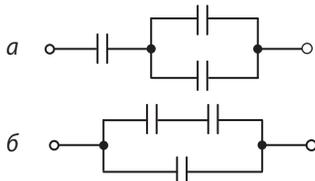


Рис. 1

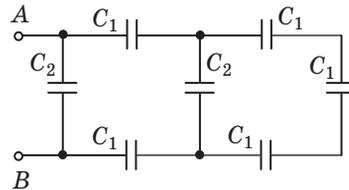


Рис. 2

9. Узнайте об истории создания конденсаторов и технологиях производства современных конденсаторов.

### Физика и техника в Украине



Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка основан 19 августа 1930 г. как Институт инженеров сельскохозяйственного строительства. Первым ректором института (1930–1934) стал *Дмитрий Иванович Ильяшенко*. В 1961 г. институт был переименован в Инженерно-строительный институт, в 1994 г. — в Полтавский технический университет, а в 2002 г. ему присвоен статус национального. В июне 1997 г. учебному заведению присвоено имя *Юрия Кондратюка (Александра Шаргея)*.

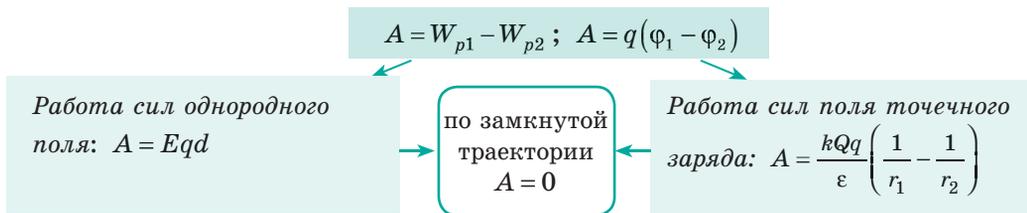
Сегодня более 10 000 студентов обучаются по 42 специальностям на 8 факультетах университета. Наибольшей популярностью пользуются факультеты архитектуры, строительный, электромеханический, нефти, газа и природопользования, информационных и телекоммуникационных технологий и систем.

## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА IV «ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ»

1. Вы углубили свои знания об *электрическом поле*.

**Электрическое поле** — форма материи, которая существует вокруг заряженных тел и проявляется в действии с некоторой силой на любое заряженное тело в этом поле.

2. Вы доказали, что электростатическое поле обладает *энергией*, за счет которой силы, действующие со стороны поля на электрический заряд, совершают *работу*:



3. Вы узнали о *физических величинах, характеризующих электрическое поле*.

### Характеристики электрического поля

#### Силовая

Напряженность:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; [E] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$

Для поля точечного заряда:  $E = \frac{k|q|}{\varepsilon r^2}$

#### Энергетическая

Потенциал:  $\varphi = \frac{W_p}{q}; [\varphi] = 1 \text{ В}$

Для поля точечного заряда:  $\varphi = \frac{kq}{\varepsilon r}$

4. Вы узнали, что *графически изобразить* электростатическое поле можно с помощью силовых линий и с помощью эквипотенциальных поверхностей.

5. Вы вспомнили, как электрическое поле влияет на вещество, узнали, как вещество влияет на электрическое поле.

Проводники:  $E = E_0 - E' = 0$

Диэлектрики:  $E = E_0 - E'; \varepsilon = \frac{E_0}{E}$

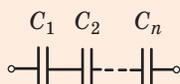
6. Вы узнали о *конденсаторах*, о том, что их классифицируют по назначению, форме обкладок, типу диэлектрика; узнали об *емкости конденсатора (C)*, *энергии конденсатора (W)*.

$C = \frac{q}{U}$ ; для плоского конденсатора:  $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$

$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$

### Виды соединения конденсаторов

#### Последовательное

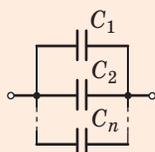


$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$

$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$

$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

#### Параллельное



$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$

$U_1 = U_2 = \dots = U_n$

$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

**Задание 1.** На шелковой нити висит металлический шарик, заряд которого  $+20$  нКл, а масса  $2$  г. Под ним на некотором расстоянии разместили такой же шарик, но с зарядом  $-4$  нКл.

- (1 балл) Изменится ли сила натяжения нити, и если изменится, то как?  
а) увеличится;                      в) останется неизменной;  
б) уменьшится;                      г) сначала увеличится, а затем уменьшится.
- (3 балла) На каком расстоянии нужно расположить второй шарик, чтобы сила натяжения нити изменилась в  $2$  раза? Шарики находятся в воздухе.

**Задание 2.** Электрон, пройдя в вакууме вдоль силовой линии электрического поля из точки 1 в точку 2, остановился в результате действия поля. Разность потенциалов между точками 1 и 2 —  $400$  В.

- (1 балл) Какая из сил (рис. 1) показывает направление силы, действующей на электрон?  
а)  $\vec{F}_1$ ;                      б)  $\vec{F}_2$ ;                      в)  $\vec{F}_3$ ;                      г)  $\vec{F}_4$ .
- (2 балла) Какую работу совершило электрическое поле?
- (3 балла) Какой была начальная скорость движения электрона? Какое расстояние между точками 1 и 2, если напряженность электрического поля  $8$  кВ/м?
- (4 балла) Чему будет равно изменение кинетической энергии электрона, если он попадет в электрическое поле с той же начальной скоростью, но перпендикулярно силовым линиям поля? Время движения электрона в поле —  $2 \cdot 10^{-8}$  с. Напряженность поля —  $300$  В/м.

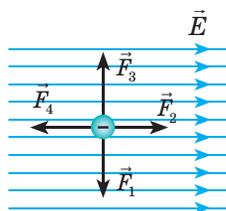


Рис. 1

**Задание 3.** Два точечных заряда, значение каждого из которых  $40$  мкКл, поместили в вакууме на некотором расстоянии друг от друга.

- (2 балла) Какова напряженность электрического поля в точке, находящейся посередине между этими зарядами?

**Задание 4.** На рис. 2 изображен слюдяной конденсатор, на корпусе которого указаны значения емкости и рабочего напряжения.

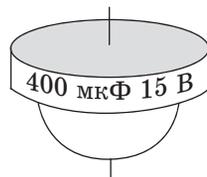


Рис. 2

- (2 балла) Определите модуль заряда одной из обкладок конденсатора, заряженного до рабочего напряжения.  
а)  $6$  мКл;                      б)  $27$  мкКл;                      в)  $38$  кКл;                      г)  $400$  мкКл.
- (3 балла) Как изменится энергия конденсатора, если его зарядить до рабочего напряжения, отключить от источника, а затем присоединить параллельно к этому конденсатору такой же, но незаряженный конденсатор?
- (3 балла) Найдите электроемкость батареи таких конденсаторов, если их соединить так, как показано на рис. 3.

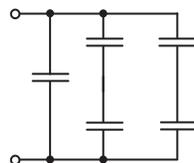


Рис. 3

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, выполненные правильно, подсчитайте сумму баллов. Разделите эту сумму на два. Полученное число соответствует уровню ваших учебных достижений.



Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой вы найдете на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».

## СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Многие из вас пользуются мобильным телефоном и другими электрическими приборами, поэтому надеемся, что по крайней мере на бытовом уровне вы знаете об электричестве несколько больше, чем изложено в разделе IV. А сейчас речь пойдет о сравнительно новом источнике электрической энергии — *солнечных батареях* — и о тех изменениях, которые они принесут в нашу жизнь в ближайшем будущем.

Энергия Солнца — это основа жизни на Земле. Но на протяжении почти всей своей истории человечество не умело непосредственно преобразовывать солнечную энергию и было вынуждено пользоваться, так сказать, вторичными продуктами: дровами, торфом, углем и т. д. Только на рубеже XIX и XX вв. был открыт *внутренний фотоэффект* — возникновение электрического тока в некоторых материалах под воздействием солнечного излучения. И понадобилось почти столет, чтобы фотоэлектрические преобразователи, которые сейчас называют *солнечными батареями (солнечными панелями)*, «родились» как промышленность. Бурное развитие их практического применения происходит на ваших глазах. Так, мощность солнечных панелей в мире в 2001 г. составляла примерно 700 МВт (это приблизительно мощность достаточно небольшой Днепропетровской ГЭС), а вот в 2016 г. уже говорилось о 230 ГВт, что почти в 5 раз больше, чем вся энергетика Украины.

Сейчас много пишут о будущем истощении мировых запасов нефти и

газа. Существует ли подобная угроза для развития солнечной энергетики?

Количество энергии, которую Земля получает от Солнца за 10 минут, примерно такое же, как потребляемое человечеством за год. Получается, что для замещения других источников энергии нужно «засеять» солнечными батареями не всю поверхность Земли, а только ее достаточно небольшую часть, примерно равную территории Австрии или Чехии. Поэтому в ближайшие столетия «исчерпания солнечных ресурсов» не будет. Но технически невозможно, по крайней мере сейчас, сконцентрировать всю энергетику планеты в одном небольшом регионе, поэтому инженеры пошли другим путем: для размещения солнечных батарей они применяют имеющиеся элементы сооружений. Самый известный пример — солнечные батареи на крыше (рис. 1). Более современное решение — *«интегрированные батареи»*, то есть солнечные батареи, соединенные с конструктивными элементами здания — окнами, кирпичами, черепицей и т. д.

А еще вспомним автомобиль «Тесла» на электрической тяге, который, пожалуй, начал новую эру в автомобилестроении. Больше всего, наверное, поражает грузовик на электрической тяге (рис. 2). С полным грузом (36 тонн) этот автомобиль за 20 с разгоняется до скорости 100 км/ч и может перевезти этот груз без подзарядки на расстояние 800 км.

Солнечная энергетика завершает свое «детство». Каким будет ее взрослая жизнь?

Рис. 1



Рис. 2



## ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ И ЗАДАНИЯМ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### Введение

**№ 2.** 1. 8 %. 2. 1) 2,1 мм; 0,1 мм; 0,2 мм; 9,5 %; 2)  $2,1 \pm 0,2$  (мм). **№ 3.** 1. Нет; нет; нет; да. 3.  $a_x=2$ ;  $a_y=3$ ;  $b_y=0$ ;  $c_x=3$ ,  $c_y=-4$ ;  $d_x=-4$ ,  $d_y=0$ ;  $l_x=0$ ,  $l_y=-3$ ;  $s_x=-2$ ,  $s_y=-5$ .

### Раздел I. Механика

#### Часть 1. Кинематика

**№ 4.** 1. Одномерную; двумерную; двумерную; трехмерную; трехмерную. 2. Солнце. 3. С собой. 4. 31,4 м; 28,3 м. 5. Прямой; параболической. **№ 5.** 1. 11 м/с; 9 м/с. 2. 167 м; 174 м. 3. I четверть: 0,94 м/с, 0,85 м/с; II четверть: 0,47 м/с, 0,42 м/с; полу-круг: 0,6 м/с, 0,4 м/с. 4.  $x_1(t) = -700 + 5t$ ,  $x_2(t) = 500 - 20t$ ,  $x_3(t) = 1400 - 25t$ ;  $t_{21} = 48$  с,  $x_{21} = -460$  м;  $t_{31} = 70$  с,  $x_{31} = -350$  м;  $t_{23} = 180$  с,  $x_{23} = -3100$  м. 5. Курс самолета должен отклониться от северного направления на угол  $7,7^\circ$  на запад; 2 ч 1 мин. 6. 40 км/ч. **№ 6.** 1. 1)  $-4$  м/с<sup>2</sup>, 20 м/с; 2) 5 с. 2. 1) 18,75 м; 2) 5 с; 3)  $v_x = 2,5 + 0,5t$ ,  $s_x = 2,5t + 0,25t^2$ ; 4) 3,5 м/с, 3 с; 6) 4 с. 3. 2)  $s_x = -18t + 0,9t^2$ . 4. 10 с; 120 м. **№ 7.** 1. Ускорение одинаковое; 6 м/с. 2. 5 м; 10 м; 0. 3. 1) а) 20 м/с; б) 3,5 с; в) 35 м; 2) 35 м. 4. 1) 4,16 с, 31,6 м/с; 2) 2,16 с, 31,6 м/с; 3) 3 с, 30 м/с. **№ 8.** 2. В точке B — наибольшее, в точке A — наименьшее. 3. 3,3 м/с<sup>2</sup>. 4. В 1,5 раза. 5. 6,3 м/с; 150 оборотов. 6. 1200 раз. 7. 1675 км/ч.

#### Задания для самопроверки к разделу I. Часть 1

1. г. 2. б. 3. в. 4. б. 5. 1 мин 38 с. 6. 24 м; 4,8 м/с 7. 2 м; 7 м/с. 8. 3,2 м. 9. 7 м/с;  $\approx 1,2$  м. 10.  $x = -1 + 4t - t^2$ ;  $v_x = 4 - 2t$ .

#### Часть 2. Динамика и законы сохранения

**№ 9.** 3. CO1: 20 м, 2 с, 10 м/с<sup>2</sup>, 20 м/с; CO2: 36 м, 2 с, 10 м/с<sup>2</sup>, 25 м/с. 5. а) 6 Н; направлена влево; б) 4 Н; направлена влево; в) 10 Н; направлена вдоль направления силы  $F_2$ . **№ 10.** 2. Нет. 3. 270 г. 6. 1) 4200 Н; 2) 960 Н. **№ 11.** 3. 1) увеличится в 3 раза; 2) уменьшится в 9 раз. 4. В 49 раз. 5.  $2 \cdot 10^{30}$  кг. 6. 5520 с;  $\approx 6800$  км. 7. 42 000 км. **№ 12.** 1. 20 см. 2. В точке A; в точке B; в точке B. 3. 100 кН/м. 4. 1) 10 Н; 2) 5 Н; 3) 15 Н. 5. В точке A — 20 кН; в точке B — 15,5 кН; в точке B — 22,25 кН; 114 км/ч. 6. 3,2 м/с. 7. 3 кН. **№ 13.** 4. 25 м; 2,5 с. 5. 20 с. 6. 43 Н. **№ 14.** 1. а) устойчивое; б) неустойчивое; в) безразличное. 4. 100 Н. 5.  $39^\circ$ . **№ 15.** 2. 500 Дж. 3. 1800 МДж. 4. 1-А, 2-Б, 3-Г. 5. 150 кДж. 6.  $E_k \uparrow$  в 2 раза. 7. 420 кДж; 42 кВт. **№ 16.** 1. Нет. 3. 2 м. 5. 15 м. 6. 1 м/с. 7.  $-250$  Дж; 63 см. **№ 17.** 1. Импульс не изменится. 2. 1) 0; 2) 19,6 кг; 3) 3 м/с. 3. 3 кг или 330 г.

#### Задания для самопроверки к разделу I. Часть 2

1. в. 2. г. 3. 1-Д, 2-В, 3-А, 4-Б. 4. г. 5. б. 6. г. 7. 30 мДж, 10 см. 8. 0,25. 9. 0,3 м/с<sup>2</sup>. 10. 5,4 Дж.

#### Часть 3. Механические колебания и волны

**№ 19.** 2. 1) 0,5 Гц, 3,14 рад/с; 2) 5; 3) 30 см. 3. 0,4 м; 3 с; 0,33 Гц;  $\approx 0,8$  м/с,  $\approx 1,8$  м/с<sup>2</sup>. 4.  $x(t) = 0,1 \cos(2\pi t)$  (м). 5. 1) 2 м, 4 с, 0,25 Гц,  $x(t) = 2 \cos(\pi t/2)$  (м); 2) 5 см, 0,4 с, 2,5 Гц,  $x(t) = 0,05 \sin(5\pi t)$  (м). **№ 20.** 1. 1) T не изменится; 2) T↓; 3) T↓. 2. Нет. 3. Часы начнут спешить; часы будут незначительно отставать. 4. 2,3 кг. 5. 2 мм; 1 м. 6. 1)  $10\pi$  рад/с, 0,2 с; 2) 4,9 кН/м; 3) 98 Дж; 4) 0,14 м; 49 Дж; 49 Дж. **№ 21.** 2. Нет. 3. 20 м/с. 4. 160 Н/м. 5. 20 м/с. **№ 22.** 1. 1-Б, 2-Г, 3-А. 2. 20 мм; продольная. 3. 1) 0,2 см, 1,6 м, 0,94 Гц; 2) справа налево; 3) A — вниз, C — вверх; 4) A — вниз, B — вверх, C — вверх. **№ 23.** 1. 0,77 м; 3,4 м; 11,4 м. 2. 600 м. 3.  $\lambda \downarrow$  в 4,4 раза. 4. Благодаря дифракции звуковых волн.

Задания для самопроверки к разделу I. Часть 3

1. в. 2. б. 3. 1—Д, 2—Б, 3—А, 4—В. 4. 1—Г, 2—Б, 3—А. 5. а. 6.  $\vec{v}_A \uparrow, a_A=0; \vec{v}_B \downarrow, \vec{a}_B \uparrow$ .  
7.  $x=0,1\sin 10\pi t$ . 8.  $l=1,25$  м;  $s=5$  см. 9.  $\approx 2,1$  с. 10.  $k=8$  Н/м;  $v_{\max}=31,4$  см/с;  $E_p=5$  мДж.

**Раздел II. Элементы специальной теории относительности**

- № 24. 1. с. 2. с. 3. 0,95с; 0,38с. 4. а) 0,94с; б) 420 000 км. № 25. 1.  $\tau=3,3$  года.  
2.  $l=2,5$  м. 3. В 2 раза. 4.  $\approx 5,6 \cdot 10^{14}$  кг.

**Раздел III. Молекулярная физика и термодинамика**

**Часть 1. Молекулярная физика**

- № 26. 1.  $\approx 1,7 \cdot 10^{-9}$  м. 2.  $3,34 \cdot 10^{25}$ . 3. а)  $M=28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=35,7$  моль,  $m_0=4,65 \cdot 10^{-26}$  кг; б)  $M=44 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=22,7$  моль,  $m_0=7,3 \cdot 10^{-26}$  кг; в)  $M=16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N=6,02 \cdot 10^{25}$ ,  
 $v=62,5$  моль,  $m_0=2,66 \cdot 10^{-26}$  кг. 4. 190 млрд. № 27. 2. Диффузией; в теплом.  
3. Диффузии. 6. Да; недолго. № 28. 1. 2) а)  $p \uparrow, V \downarrow, v_{\text{кв}}, m_0$  не изменится,  $\rho \uparrow$ ;  
б)  $p \downarrow, V \uparrow, t \downarrow, \vec{v}_{\text{кв}} \downarrow, m_0$  не изменится,  $\rho \downarrow$ . 2.  $p \uparrow$  в 4 раза. 3.  $p \uparrow$  в 9 раз. 4.  $1,3$  м<sup>3</sup>.  
5.  $8,4 \cdot 10^{-21}$  Дж. № 29. 2. 184 К;  $-128$  F. 3.  $p \uparrow$  в 4 раза;  $\vec{v}_{\text{кв}} \uparrow$  в 2 раза. 4.  $3,6 \cdot 10^{27}$ .  
№ 30. 1.  $p \uparrow$  в 8 раз. 2.  $\approx 20$  м. 3. 2,14 атм. 5.  $p \downarrow$ . № 31. 5. Можно. 6. Нет. № 32. 4. 40 %;  
 $7,76$  г/м<sup>3</sup>; 776 г; 194 г. № 33. 2.  $5,82 \cdot 10^{-5}$  м. 3. 3,2 Па. 4. 0,041 Н/м. 5. 0,21 мДж.  
№ 34. 2. б — с монокристаллической; в — с поликристаллической. № 35. 3. 1) 0,1 МПа;  
2) 0,1; 3) 1 МПа; 4) 0,28 мм. 4. 22 кН. 5. 1 — для хрупкого; 2 — пластического;  
3 — упругого.

Задания для самопроверки к разделу III. Часть 1

1. в. 2. г. 3. г. 4. а. 5. в. 6. 1—В, 2—Д, 3—Г, 4—Б. 7.  $2,9 \cdot 10^{22}$ . 8.  $p \downarrow, T \downarrow, V \uparrow$ . 9. Не выпадет.  
10. 1,2 мм;  $h \downarrow$  на 1,2 см;  $h \downarrow$  на 1,4 см;  $h \uparrow$  на 3,6 см.

**Часть 2. Основы термодинамики**

- № 36. 1.  $-14$  кДж. 2. 225 Дж; 9 К. 3. а)  $U \downarrow$  на 3750 Дж; б)  $U \uparrow$  на 10 500 Дж; в)  $U \uparrow$  на  
15 000 Дж; г)  $U$  не изменится. 4. 2,9 кг. 5. 190 кг. № 37. 2. 3,9 кДж. 3.  $\approx 3,3$  кДж.  
4.  $-500$  кДж; 450 кДж. 5.  $A_{123} > A_{123}$ . № 38. 1.  $\Delta U = -15$  Дж;  $A = 0$ . 2.  $\Delta U = -3,6$  Дж;  
 $A = -2,4$  Дж. 3. При изобарном расширении. 4. а)  $5,6 \cdot 10^2$  Дж; б) 1,9 кДж;  
в)  $2,6 \cdot 10^2$  Дж; г) отдавал, 475 кДж. 5. 8,3 кДж;  $\Delta U = 21$  кДж. № 39. 1. Нельзя.  
2. 50 %; 67 %;  $\frac{n-1}{n}$ . 3. 90 Дж; 37,5 %. 4.  $\approx 500$  г.

Задания для самопроверки к разделу III. Часть 2

1. в. 2. в. 3. г. 4. б. 5. 1—Г; 2—Д; 3—А; 4—Б. 6. 1,5 кДж; 0. 7. 1,0 кДж; 1,5 кДж.  
8. 143 г. 9. 750 Дж; 0; 1875 Дж; 29 %.

**Раздел IV. Электрическое поле**

- № 40. 2.  $\downarrow$  в 4 раза. 3. а)  $\uparrow$  в 1,8 раза; б)  $\downarrow$  в 1,25 раза. № 41. 1. 10 мкН. 2. 250 Н/Кл.  
3. а) электрон — прямолинейно,  $v_{\text{эл}} \uparrow$ , протон — прямолинейно,  $v_{\text{пр}} \downarrow$ ; б) по параболической  
траектории,  $v_{\text{эл}} \uparrow, v_{\text{пр}} \uparrow$ . 4. 5400 Н/Кл. 5. а) 0; б)  $\frac{4kg}{a^2}$ . 6.  $E_A = 8kq/a^2; E_B = E_C = \frac{32kg}{9a^2}$ .  
№ 42. 1.  $W_p \downarrow$  в 2 раза;  $W_p \uparrow$  в 4 раза. 2.  $-3$  мкДж;  $A \uparrow$ . 3.  $-0,9$  Дж; нет. 4. 4 нКл.  
5. 2,275 кВ. № 43. 3. Да. 4. 367 нКл. 5. 0,46 мкКл. № 44. 1. 5 мкФ, 360 мкДж,  $W \downarrow$   
в 2 раза. 2. При параллельном  $C \uparrow$  в 16 раз. 3.  $(2/3)C$ . 4.  $W \downarrow$  в 2 раза. 5. 80 В и 40 В.  
6. 150 В. 7.  $W \downarrow$  на 0,29 мкДж. 8.  $\approx 1,6$  мкФ.

Задания для самопроверки к разделу IV

- Задание 1. 1. а. 2. 6 мм. Задание 2. 1. г. 2.  $-6,4 \cdot 10^{-17}$  Дж. 3.  $1,2 \cdot 10^7$  м/с, 5 см.  
4.  $5,1 \cdot 10^{-19}$  Дж. Задание 3. 1. 0. Задание 4. 1. а. 2.  $W \downarrow$  в 4 раза. 3. 800 мкФ.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- А** Абсолютный нуль температуры 178  
Автоколебания 121  
Агрегатные состояния вещества 169  
Аморфные вещества 169, 202  
Амплитуда колебаний 119, 122  
Анизотропия 204  
Атом 160
- Б** Броуновское движение 165
- В** Вес тела 75  
Взаимодействие гравитационное 66  
Влажность 192, 194  
Волна 136–138, 141  
Высота звука 141
- Г** Гигрометр 193  
Громкость звука 142
- Д** Давление  
— газа 172  
— Лапласа 200  
Двигатель 230, 232  
Движение  
— вращательное 87  
— механическое 20  
— поступательное 87  
— равномерное по окружности 48  
— равномерное прямолинейное 26  
— равноускоренное прямолинейное 33  
— реактивное 105  
— тела, брошенного горизонтально 44  
— тела, брошенного под углом  
к горизонту 45  
Деформация 72, 207  
Дифракция 138  
Диффузия 166  
Диэлектрики 253  
Диэлектрическая проницаемость 255  
Длина волны 136
- Ж** Жесткость 74
- З** Жидкие кристаллы 205  
Заземление 253  
Закон  
— Амонтона — Кулона 82  
— Бернулли 112  
— Бойля — Мариотта 181  
— всемирного тяготения 67  
— Гей-Люссака 182  
— Гука 73, 208  
— инерции 56  
— Кулона 239  
— Ньютона  
— — второй 62  
— — первый 58  
— — третий 63  
— сложения перемещений 30  
— сложения скоростей  
— — классический 30 150  
— — релятивистский 153  
— сохранения импульса 105  
— сохранения полной механической  
энергии 101  
— сохранения электрического  
заряда 239  
— термодинамики  
— — второй 229, 231  
— — первый 224  
— Шарля 183  
Заряд 237, 239  
Защита электростатическая 253
- И** Идеальный газ 172  
Излучение 217  
Изопроцессы 180–182  
Изотропия 202  
Импульс 104  
Индукция электростатическая 251  
Инертность 61  
Инерция 57  
Интерференция 138  
Инфразвук 144  
Ион 161  
Испарение 184
- К** Капилляр 200  
Кипение 189  
Колебания 119–122  
Количество вещества 162  
Количество теплоты 218  
Конвекция 217  
Конденсатор 257  
Конденсация 187  
Концентрация молекул 172
- Л** Линии напряженности 243
- М** Масса 61  
Материальная точка 22  
Маятник 125, 127  
Модель физическая 10  
Момент силы 88  
Монокристалл 204  
Мощность 95
- Н** Напряжение механическое 208  
Напряженность 242  
Насыщенный пар 187  
Невесомость 76  
Необратимые процессы 231
- О** Опыт  
— Милликена 238  
— Штерна 167  
Основное уравнение МКТ 176  
Основные положения МКТ 160  
Относительность движения 23
- П** Парообразование 184  
Перемещение 22  
Период  
— вращения 48  
— колебаний 119, 126, 127  
Поверхностное натяжение 197, 198  
Погрешности измерений 13, 14  
Поле  
— гравитационное 66  
— потенциальное 245  
— электрическое 241

- Поликристалл 204  
 Полиморфизм 203  
 Постулаты СТО 151, 152  
 Потенциал 246  
 Принцип  
 — относительности Галилея 58, 150  
 — суперпозиции 243  
 Проводники 51  
 Психрометр 194  
 Путь 22
- Р** Работа  
 — газа 221  
 — механическая 92  
 — электростатического поля 245, 246  
 Равновесие динамическое 187  
 Равновесие тела 87, 89  
 Разность потенциалов 247  
 Резонанс 131  
 — акустический 143
- С** Свободное падение 40  
 Сила 60  
 — консервативная 98  
 — натяжения подвеса 74  
 — нормальной реакции опоры 75  
 — поверхностного натяжения 197  
 — подъемная 112  
 — сопротивления среды 83  
 — трения 80–82  
 — тяжести 68  
 — упругости 73  
 Система отсчета 21 57  
 Скорость  
 — линейная 48, 49  
 — мгновенная 29  
 — первая космическая 70  
 — равномерного прямолинейного движения 26  
 — равноускоренного прямолинейного движения 34  
 — средняя векторная 28  
 — средняя квадратическая 172  
 — средняя путевая 28  
 — угловая 49  
 Смачивание 199  
 Смещение 119  
 Событие 152  
 Соединение конденсаторов 258, 259  
 Состояние теплового равновесия 175  
 Специальная теория относительности 151
- Т** Тембр звука 142  
 Температура 175  
 — абсолютная 177  
 Теорема  
 — о кинетической энергии 94  
 — о потенциальной энергии 100  
 Тепловой двигатель 232  
 Теплоемкость 218  
 Теплопередача 217  
 Теплопроводность 217
- Термометр 176  
 Точка росы 193  
 Траектория движения 22
- У** Удлинение 73  
 — относительное 208  
 Ультразвук 144  
 Уравнение  
 — гармонических колебаний 122  
 — Клапейрона 184  
 — координаты тела 23  
 — — при свободном падении 41  
 — — равномерном прямолинейном движении 27  
 — — равноускоренном прямолинейном движении 36  
 — неразрывности потока 111  
 — состояния идеального газа (Менделеева — Клапейрона) 184  
 Ускорение 33  
 — равноускоренного движения 33  
 — свободного падения 40  
 — центростремительное 50  
 Условия равновесия 88
- Ф** Фаза колебаний 122  
 Фазовые состояния вещества 169, 203  
 Формула  
 — волны 136  
 — Гюйгенса 129  
 — Эйнштейна 157  
 Фронт волны 137
- Х** Холодильная машина 233
- Ц** Центр масс 87, 116  
 Цикл Карно 231
- Ч** Частота колебаний 119  
 Число Авогадро 166
- Ш** Шкала температурная 175, 176
- Э** Эквипотенциальная поверхность 247  
 Электризация 238  
 Электроемкость 257, 258  
 Энергия  
 — внутренняя 216  
 — кинетическая 94  
 — конденсатора 260  
 — механическая 98  
 — поверхностная 196  
 — покоя 157  
 — полная механическая 100  
 — потенциальная 98  
 — — взаимодействия точечных зарядов 246  
 — — поднятого тела 99  
 — — упруго деформированного тела 100  
 Эталон 12  
 Эффект  
 — близнецов 157  
 — замедления времени релятивистский 156  
 — сокращения длины релятивистский 155

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Ориентировочные темы проектов, рефератов и сообщений, экспериментальных исследований . . . . .	4

### Вступление

§ 1. Зарождение и развитие физики как науки . . . . .	5
§ 2. Методы научного познания. Физические величины и их измерение. Погрешности измерений . . . . .	10
§ 3. Скалярные и векторные величины . . . . .	16

### Раздел I. Механика

#### Часть 1. Кинематика

§ 4. Основная задача механики. Азбука кинематики . . . . .	20
§ 5. Скорость движения. Средняя и мгновенная скорости. Законы сложения перемещений и скоростей . . . . .	26
§ 6. Равноускоренное прямолинейное движение. Ускорение . . . . .	33
§ 7. Свободное падение и криволинейное движение под действием постоянной силы тяжести . . . . .	39
§ 8. Равномерное движение по окружности . . . . .	47
<i>Лабораторная работа № 1</i> . . . . .	52
<i>Лабораторная работа № 2</i> . . . . .	53
Подводим итоги раздела I. Часть 1. . . . .	54
Задания для самопроверки к разделу I. Часть 1. . . . .	55

#### Часть 2. Динамика и законы сохранения

§ 9. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона . . . . .	56
§ 10. Сила. Масса. Второй и третий законы Ньютона . . . . .	60
§ 11. Гравитационное поле. Сила притяжения. Первая космическая скорость . . . . .	66
§ 12. Сила упругости. Вес тела . . . . .	72
§ 13. Сила трения . . . . .	80
§ 14. Равновесие тел. Момент силы . . . . .	87
§ 15. Механическая работа. Кинетическая энергия. Мощность . . . . .	92
§ 16. Потенциальная энергия. Закон сохранения механической энергии . . . . .	98
§ 17. Импульс тела. Реактивное движение. Упругий и неупругий удары . . . . .	104
§ 18. Движение жидкости и газа. Подъемная сила крыла . . . . .	111
<i>Лабораторная работа № 3</i> . . . . .	115
<i>Лабораторная работа № 4</i> . . . . .	116
Подводим итоги раздела I. Часть 2. . . . .	117
Задания для самопроверки к разделу I. Часть 2 . . . . .	118

#### Часть 3. Механические колебания и волны

§ 19. Виды механических колебаний . . . . .	119
§ 20. Математический и пружинный маятники. Энергия колебаний . . . . .	125
§ 21. Резонанс . . . . .	131
§ 22. Механические волны . . . . .	134
§ 23. Звуковые волны . . . . .	141
<i>Лабораторная работа № 5</i> . . . . .	146
Подводим итоги раздела I. Часть 3 . . . . .	147
Задания для самопроверки к разделу I. Часть 3 . . . . .	148
Энциклопедическая страница . . . . .	149

## Раздел II. Элементы специальной теории относительности

§ 24. Постулаты специальной теории относительности. Релятивистский закон сложения скоростей . . . . .	150
§ 25. Следствия постулатов специальной теории относительности . . . . .	155
Подводим итоги раздела II . . . . .	159

## Раздел III. Молекулярная физика и термодинамика

### Часть 1. Молекулярная физика

§ 26. Основные положения молекулярно-кинетической теории . . . . .	160
§ 27. Движение и взаимодействие молекул . . . . .	165
§ 28. Основное уравнение МКТ идеального газа . . . . .	171
§ 29. Температура. Температурная шкала Кельвина . . . . .	175
§ 30. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы . . . . .	179
§ 31. Парообразование и конденсация. Насыщенный и ненасыщенный пар. Кипение . . . . .	186
§ 32. Влажность воздуха. Точка росы . . . . .	192
§ 33. Поверхностное натяжение жидкости. Смачивание. Капиллярные явления . . . . .	196
§ 34. Строение и свойства твердых тел. Анизотропия кристаллов. Жидкие кристаллы . . . . .	202
§ 35. Механические свойства твердых тел . . . . .	206
<i>Лабораторная работа № 6 . . . . .</i>	212
<i>Лабораторная работа № 7 . . . . .</i>	213
Подводим итоги раздела III. Часть 1 . . . . .	214
Задания для самопроверки к разделу III. Часть 1 . . . . .	215

### Часть 2. Основы термодинамики

§ 36. Внутренняя энергия и способы ее изменения . . . . .	216
§ 37. Работа в термодинамике . . . . .	221
§ 38. Первый закон термодинамики. Адиабатный процесс . . . . .	224
§ 39. Принцип действия тепловых двигателей. Холодильная машина . . . . .	228
Подводим итоги раздела III. Часть 2 . . . . .	235
Задания для самопроверки к разделу III. Часть 2 . . . . .	236

## Раздел IV. Электрическое поле

§ 40. Азбука электростатики . . . . .	237
§ 41. Электрическое поле . . . . .	241
§ 42. Работа по перемещению заряда в электростатическом поле. Потенциал . . . . .	245
§ 43. Проводники и диэлектрики в электрическом поле . . . . .	251
§ 44. Емкость. Конденсаторы. Энергия заряженного конденсатора . . . . .	257
Подводим итоги раздела IV . . . . .	263
Задания для самопроверки к разделу IV . . . . .	264
Энциклопедическая страница . . . . .	265
Ответы к упражнениям и заданиям для самопроверки . . . . .	266
Алфавитный указатель . . . . .	268

*Рубрика «Физика и техника в Украине»:*

Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова (9); А. М. Люлька (32); О. К. Антонов (65); Государственное предприятие «Антонов» (97); Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ (140); И. Я. Померанчук (174); Институт монокристаллов НАНУ (206); Национальный университет «Львовская политехника» (250); Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка (262).

## Сведения о пользовании учебником

№ п/п	Фамилия и имя ученика/ученицы	Учебный год	Состояние учебника	
			в начале года	в конце года
1				
2				
3				
4				
5				

Навчальне видання

*БАР'ЯХТАР Віктор Григорович  
ДОВГИЙ Станіслав Олексійович  
БОЖИНОВА Файна Якієвна  
КІРЮХІНА Олена Олександрівна*

### «ФІЗИКА

(рівень стандарту, за навчальною програмою  
авторського колективу  
під керівництвом Локтева В. М.)»  
підручник для 10 класу закладів загальної середньої освіти  
з навчанням російською мовою  
За редакцією В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого  
(російською мовою)

**Рекомендовано Міністерством освіти і науки України**

Видано за рахунок державних коштів. Продаж заборонено

Провідний редактор *І. Л. Морєва*. Редактор *О. В. Костіна*.  
Художнє оформлення *В. І. Труфєн*. Технічний редактор *А. В. Пліско*.  
Комп'ютерна верстка *С. В. Яшиш*. Коректор *Н. В. Красна*

В оформленні підручника використані зображення,  
розміщені в мережі Інтернет для вільного використання

Підписано до друку 07.09.2018. Формат 70×100/16.  
Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 22,1. Обл.-вид. арк. 21,2.  
Тираж 13 382 прим. Зам. № 2209-2018.

ТОВ Видавництво «Ранок»,  
вул. Кібальчича, 27, к. 135, Харків 61071.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5215 від 22.09.2016.  
Адреса редакції: вул. Космічна, 21а, Харків 61145.  
E-mail: office@ranok.com.ua Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.

Надруковано у друкарні ТОВ «ТРИАДА-ПАК»,  
пров. Сімферопольський, 6, Харків, 61052.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5340 від 15.05.2017.  
Тел. +38 (057) 703-12-21. E-mail: sale@triada.kharkov.ua