

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**РАНОК**

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{m \cdot M}{(R + h)^2}$$



Интернет-  
поддержка

# ФИЗИКА

# 9

КЛАСС

Под редакцией В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$$

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$s = \frac{c \cdot t}{2}$$

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

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 20.03.2017 № 417)

Издано за счет государственных средств. Продажа запрещена

Эксперты, осуществившие экспертизу учебника в ходе проведения конкурсного отбора проектов учебников для 9 класса общеобразовательных учебных заведений и давшие заключение о целесообразности присвоения учебнику грифа «Рекомендовано Министерством образования и науки Украины»:

*С. Н. Совгира*, учитель Черкасской специализированной школы I–III ступеней № 33 имени Василия Симоненко

Черкасского городского совета Черкасской области, учитель-методист;

*Т. М. Левицкая*, заведующая городским методическим кабинетом Управления образования Нежинского городского совета Черниговской области, учитель-методист;

*А. В. Королишин*, доцент кафедры физики металлов физического факультета Львовского национального университета имени Ивана Франко, кандидат физико-математических наук

Рецензент:

*И. М. Гельфгат*, учитель физики коммунального учреждения «Харьковский физико-математический лицей № 27», учитель-методист, Заслуженный учитель Украины, кандидат физико-математических наук

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

*И. Ю. Ненашеву*, учителю-методисту, Заслуженному учителю Украины;  
*И. В. Хован*, учителю физики УВК «Доминанта», кандидату педагогических 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 : підруч. для 9 кл. загальноосвіт. навч. закл. / [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», 2017. — 272 с. : ил., фот.

Перевод с украинского *Р. А. Трифонова*

Иллюстрации художника *Владимира Хорошенко*

**Ф50 Физика** : учебник для 9 кл. общеобразоват. учеб. заведений 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», 2017. — 272 с. : ил., фот.

ISBN 978-617-09-3507-6

УДК [37.016:53](075.3)



Интернет-поддержка

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

© Барьяхтар В. Г., Довгий С. А., Божинова Ф. Я., Кирюхина Е. А., 2017

© Хорошенко В. Д., иллюстрации, 2017

© Хлыстун В. В., Солонский С. П., фотографии, 2017

© ООО Издательство «Ранок», 2017

ISBN 978-617-09-3507-6 (рус.)

ISBN 978-617-09-3356-0 (укр.)

## Дорогие друзья!

В этом учебном году вы продолжите свое путешествие в мир физики. Как и раньше, вы будете наблюдать явления природы, проводить увлекательные научные эксперименты и на каждом уроке делать собственные открытия.

Ни одно настоящее путешествие не бывает легким, зато вы узнаете много нового и удивительного об окружающем мире. А учебник, который вы держите в руках, станет для вас надежным помощником.

Будьте внимательны и настойчивы, изучая каждый параграф, и тогда вы сможете понять суть изложенного материала и применить полученные знания в повседневной жизни.

Обратите внимание на то, что параграфы заканчиваются рубриками: «Подводим итоги», «Контрольные вопросы», «Упражнение». Для чего они нужны и как с ними лучше работать?

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, а если не сможете, снова обратитесь к тексту параграфа.

Рубрика «Упражнение» сделает ваше путешествие в удивительный мир физики еще интереснее, ведь вы сможете применить полученные знания на практике. Задания этой рубрики дифференцированы по уровням сложности — от достаточно простых, требующих только внимательности, до творческих, при выполнении которых 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, уже изучавшегося в курсах природоведения, математики или на предыдущих уроках физики.

Обратите внимание на то, что в учебнике есть материал, отмеченный значками (\*), — он предназначен для тех, кто хочет знать больше.

Немало интересного вас ожидает на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение» ([interactive.ranok.com.ua](http://interactive.ranok.com.ua)). Это видеоролики, показывающие в действии тот или иной физический опыт или процесс; информация, которая поможет вам при выполнении заданий; тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой.

Физика — наука прежде всего экспериментальная, поэтому в учебнике есть *экспериментальные задания* и *лабораторные работы*. Обязательно выполняйте их — и вы будете лучше понимать и любить физику. Советуем прорабатывать *задания «со звездочкой»*, благодаря которым вы научитесь представлять результаты экспериментов так, как это делают настоящие ученые.

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

Для тех, кто хочет больше узнать о развитии физической науки и техники в Украине и мире, найдется много интересного и полезного в рубриках «Физика и техника в Украине» и «Энциклопедическая страница».

Обратите внимание на то, что в учебнике использованы обозначения, которые помогут вам ориентироваться в материале:



Подводим итоги



Задание на повторение



Контрольные вопросы



Экспериментальное задание



Упражнение



Интернет-поддержка

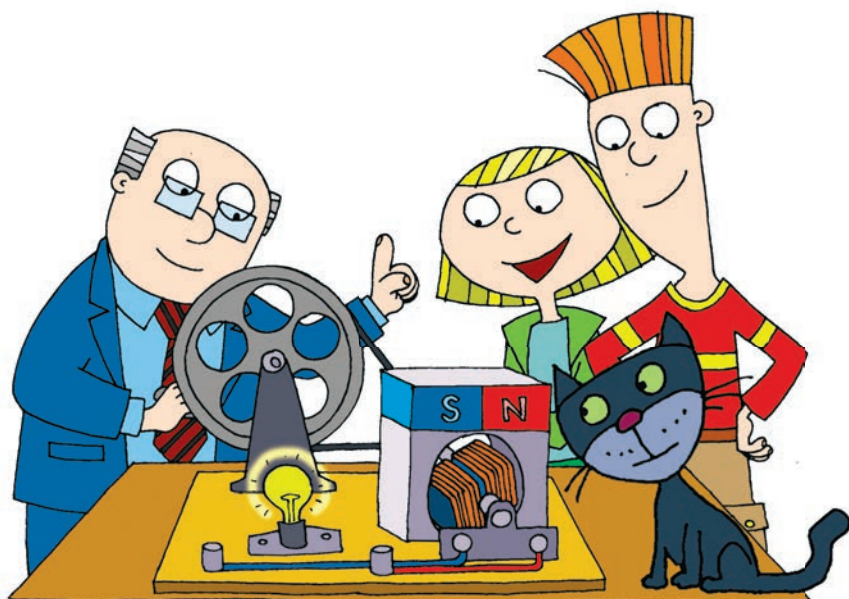
*Удачи вам и интересного путешествия в мир физики!*



# РАЗДЕЛ I

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

- Вы знаете, что не заблудитесь в лесу, если у вас есть компас, а теперь узнаете, поможет ли компас сориентироваться на ледовых просторах Арктики и Антарктики
- Вы наблюдали, как магнит притягивает железные скрепки, а теперь сможете объяснить, почему он не притягивает медные монетки
- Вы умеете измерять силу тока, а теперь узнаете о принципе действия амперметра
- Вы постоянно пользуетесь электричеством, а теперь узнаете, как работает генератор электрической энергии



## § 1. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ОПЫТ ЭРСТЕДА. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Еще в глубокой древности было замечено, что некоторые железные руды притягивают к себе железные тела. Древние греки называли куски таких руд магнитными камнями, вероятно, по названию города Магнесия, откуда привозили руду. Сейчас их называют *естественными магнитами*. Существуют также *искусственные магниты*. Сегодня вы ознакомитесь с некоторыми свойствами магнитов, узнаете о магнитном взаимодействии, а также о связи магнитных и электрических явлений.



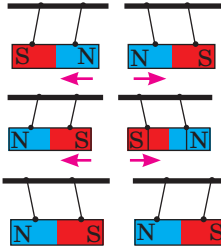
### 1 Изучаем свойства постоянных магнитов

В 5 классе, изучая курс природоведения, вы узнали о магнитных явлениях и выяснили, что некоторые тела имеют свойство притягивать к себе железные предметы и сами притягиваются к ним.

Тела, которые длительное время сохраняют магнитные свойства, называют **постоянными магнитами**.

Первую попытку научного подхода к изучению магнетизма предпринял в XIII в. французский физик *Пьер Пелерен де Марикур* (точные даты жизни неизвестны) в своем трактате «Послание о магните». Более системно свойства постоянных магнитов исследовал *Вильям Гильберт* (1544–1603) — английский физик и врач, один из основателей науки об электричестве. Приведем основные из этих свойств.

#### Основные свойства постоянных магнитов

<p>1. Магнитное действие магнита на разных участках его поверхности — разное; участки, где магнитное действие проявляется сильнее всего, называют <i>полюсами магнита</i>.</p>	<p>2. Магнит имеет два полюса — <i>северный N</i> и <i>южный S*</i>. Невозможно получить магнит только с одним полюсом.</p>	<p>3. Одноименные полюсы магнитов отталкиваются, разноименные — притягиваются.</p>	<p>4. При нагревании постоянного магнита до определенной температуры, которую называют <i>точкой Кюри</i>, его магнитные свойства исчезают.</p>								
 <p>Железные опилки</p> <p>Полюсы магнита</p>	 <p>Полосовой магнит</p> <p>Подковообразный магнит</p>		<table><tr><th>Металл</th><th>Точка Кюри, °C</th></tr><tr><td>Железо</td><td>770</td></tr><tr><td>Кобальт</td><td>1127</td></tr><tr><td>Никель</td><td>354</td></tr></table>	Металл	Точка Кюри, °C	Железо	770	Кобальт	1127	Никель	354
Металл	Точка Кюри, °C										
Железо	770										
Кобальт	1127										
Никель	354										

\* От гол. *noord* — север; *zuiden* (нем. *Süden*) — юг.

## 2 Узнаём об опытах Эрстеда и Ампера

Еще ученые Древней Греции предполагали, что магнитные и электрические явления связаны, однако установить эту связь удалось только в начале XIX в.

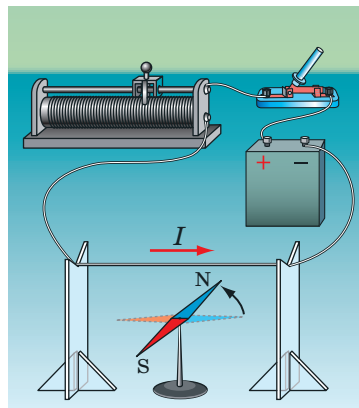
15 февраля 1820 г. датский физик *Ханс Кристиан Эрстед* (1777–1851) демонстрировал студентам опыт с нагреванием проводника электрическим током. Проводя опыт, ученый заметил, что во время прохождения тока магнитная стрелка, расположенная вблизи проводника, отклоняется от направления «север — юг» и устанавливается перпендикулярно проводнику (рис. 1.1). Когда ток в проводнике отсутствовал, стрелка возвращалась в начальное положение. Так было установлено, что *электрический ток оказывает некоторое магнитное действие*.

Французский математик и физик *Андре Мари Ампер* (1775–1836) впервые услышал об опытах Х. Эрстеда 4 сентября 1820 г. и уже через неделю продемонстрировал взаимодействие двух параллельно расположенных проводников с током (рис. 1.2). Ампер также показал, что катушки, в которых проходит электрический ток, ведут себя как постоянные магниты (рис. 1.3). Ученый пришел к выводу: поскольку проводники электрически нейтральны (не заряжены), их притягивание или отталкивание не может объясняться действием электрических сил, — «поведение» проводников является следствием действия *магнитных сил*.

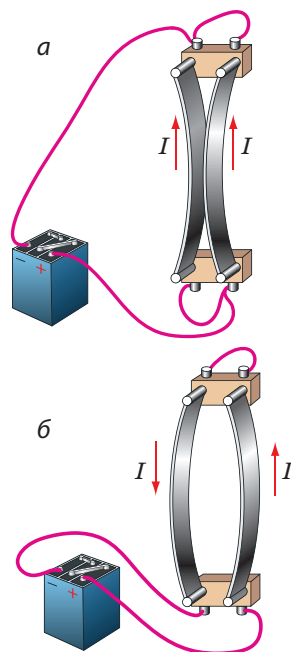
## 3 Даём определение магнитного поля

При изучении электрических явлений в 8 классе вы узнали о том, что *в пространстве около заряженного тела существует поле, которое называют электрическим, и что именно посредством этого поля осуществляется электрическое взаимодействие между заряженными телами и частицами*.

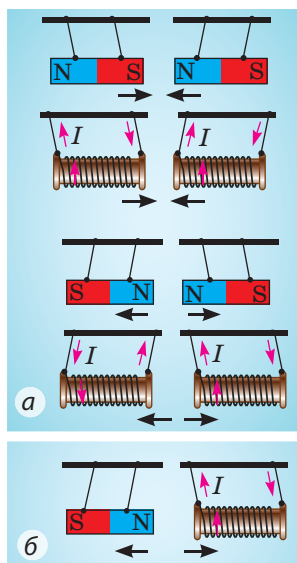
Около намагниченного тела и около проводника с током тоже существует поле — его называют *магнитным*. *Магнитное взаимодействие осуществляется с некоторой скоростью посредством магнитного поля* (первым к такому выводу пришел английский физик *Майкл Фарадей* (1791–1867)).



**Рис. 1.1.** Схема опыта Эрстеда (Здесь и далее наличие символа  $I$  означает, что в проводнике течет ток; стрелка рядом показывает направление тока.)



**Рис. 1.2.** Схема опыта А. Ампера. Если в двух параллельных проводниках проходят токи одного направления, проводники притягиваются (а); если проходят токи противоположных направлений, проводники отталкиваются (б)



**Рис. 1.3.** Катшки с током ведут себя как постоянные магниты

Рассмотрим взаимодействие постоянного магнита и катушки с током (рис. 1.3, б). Катушка с током создает магнитное поле. Магнитное поле распространяется в пространстве и начинает действовать на постоянный магнит (намагниченное тело) — магнит отклоняется. Магнит тоже создает собственное магнитное поле, которое, в свою очередь, действует на катушку с током, — и катушка тоже отклоняется.

Заметим, что магнитное поле существует также около любой движущейся заряженной частицы и около любого движущегося заряженного тела и действует с некоторой силой на заряженные тела и частицы, движущиеся в этом магнитном поле.

*Обратите внимание:* мы не можем увидеть магнитное поле, но при этом оно, как и электрическое поле, абсолютно реально — это форма материи.

**Магнитное поле** — это форма материи, которая существует около намагниченных тел, проводников с током, движущихся заряженных тел и частиц и действует на другие намагниченные тела, проводники с током, движущиеся заряженные тела и частицы, расположенные в этом поле.

**?** Обратитесь к опыту Эрстеда (см. рис. 1.1) и опыту Ампера (см. рис. 1.2) и объясните, как осуществляется магнитное взаимодействие между магнитной стрелкой и проводником с током; между двумя проводниками с током.



### Подводим итоги

Тела, длительное время сохраняющие свои магнитные свойства, называют постоянными магнитами. Основные свойства постоянных магнитов: 1) магнитное действие магнита сильнее всего проявляется вблизи его полюсов; 2) одноименные полюсы магнитов отталкиваются, разноименные — притягиваются; невозможно получить магнит только с одним полюсом; 3) при нагревании постоянного магнита до определенной температуры (точка Кюри) его магнитные свойства исчезают.

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля. Магнитное поле — это форма материи, которая существует около намагниченных тел, проводников с током, движущихся заряженных тел и частиц и действует на расположенные в этом поле намагниченные тела, проводники с током, движущиеся заряженные тела и частицы.



### Контрольные вопросы

**1.** Назовите основные свойства постоянных магнитов. **2.** Опишите опыт Х. Эрстеда. В чем суть его открытия? **3.** Опишите опыты А. Ампера. Что они доказывают? **4.** Около каких объектов существует магнитное поле? На какие объекты оно действует? **5.** Дайте определение магнитного поля.



### Упражнение № 1

1. Магнитную стрелку расположили вблизи полосового магнита (рис. 1). Какой полюс магнита является южным, а какой — северным.
2. Стальную спицу намагнитили и разделили кусачками сначала на две, а потом на четыре части (рис. 2). Какое свойство магнитов демонстрирует этот опыт?
3. Почему железные опилки, притянувшись к полюсам магнита, торчат в разные стороны (см. рисунок на с. 6)?
4. Почему сужается струя расплавленного металла, когда через нее пропускают ток?
5. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, узнайте об истории открытия Х. Эрстеда. Какие исследования он провел, изучая магнитное поле проводника с током? Какие результаты получил?

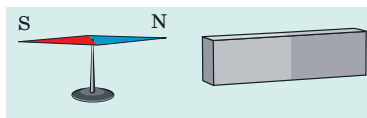


Рис. 1

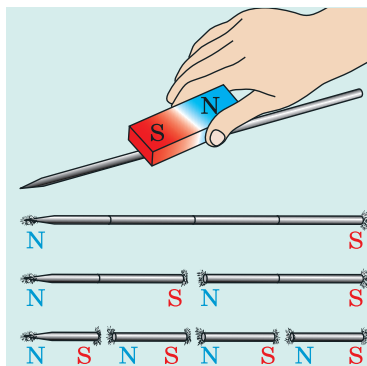


Рис. 2



### Экспериментальные задания

1. Воспользовавшись двумя-тремя постоянными магнитами, например палочками магнитного конструктора, экспериментально проверьте некоторые свойства магнитов.
2. Возьмите несколько игл с нитями. Соедините концы нитей в один пучок и медленно поднесите снизу к иглам постоянный магнит. Объясните наблюдаемое явление (рис. 3).

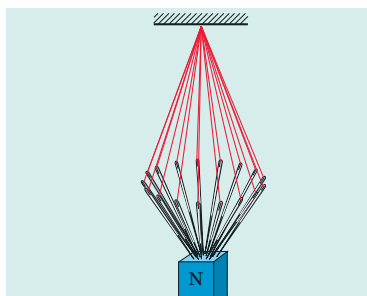


Рис. 3

## Физика и техника в Украине

**Институт магнетизма НАН и МОН Украины** (Киев) — ведущее научное учреждение, которое проводит исследования в области магнетизма и магнитных материалов. Институт является базовым в подготовке студентов физико-математического факультета НТУ «Киевский политехнический институт», физического и радиофизического факультетов Киевского национального университета им. Тараса Шевченко.

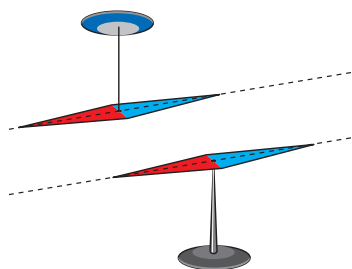
Организатором и первым директором института в 1995 г. стал выдающийся украинский физик, академик, Герой Украины *Виктор Григорьевич Барьяхтар*, известный своими фундаментальными работами в области теоретической физики, физики магнитных явлений, физики твердого тела, а также исследованиями экологических последствий Чернобыльской катастрофы. С 2016 г. институт возглавляет член-корреспондент НАПНУ *Юрий Иванович Горобец*. В. Г. Барьяхтар является почетным директором института.

В Институте магнетизма разработаны материалы для магнитных сенсоров и регистраторов информации, синтезированы и выращены монокристаллы, широко используемые в электронике; институт располагает уникальной технологией и оборудованием для напыления тонких нанопленок.

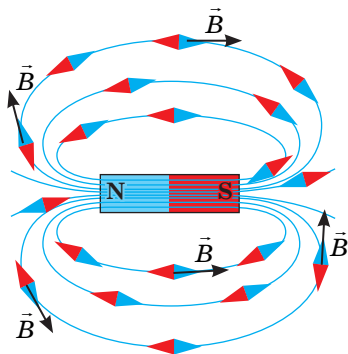
Научно-исследовательский комплекс сканирующей растровой и электронной микроскопии для наноструктурных исследований Института магнетизма отнесен к научным объектам, являющимся национальным достоянием.

## § 2. ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Мы не можем увидеть магнитное поле, однако для лучшего понимания магнитных явлений важно научиться его изображать. В этом помогут магнитные стрелки. Каждая такая стрелка — это маленький постоянный магнит, который легко поворачивается в горизонтальной плоскости (рис. 2.1). О том, как графически изображают магнитное поле и какая физическая величина его характеризует, вы узнаете из этого параграфа.



**Рис. 2.1.** Магнитная стрелка — это постоянный магнит. Пунктирной линией показана ось магнитной стрелки



**Рис. 2.2.** В магнитном поле магнитные стрелки ориентируются определенным образом: северный полюс стрелки указывает направление вектора индукции магнитного поля в данной точке

### 1 Изучаем силовую характеристику магнитного поля

Если заряженная частица движется в магнитном поле, то поле будет действовать на частицу с некоторой силой. Значение этой силы зависит от заряда частицы, направления и значения скорости ее движения, а также от того, насколько сильным является поле.

Силовой характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция*.

**Магнитная индукция (индукция магнитного поля)** — это векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля.

Магнитную индукцию обозначают символом  $\vec{B}$ .

Единица магнитной индукции в СИ — **тесла**; названа в честь сербского физика *Николы Теслы* (1856–1943):

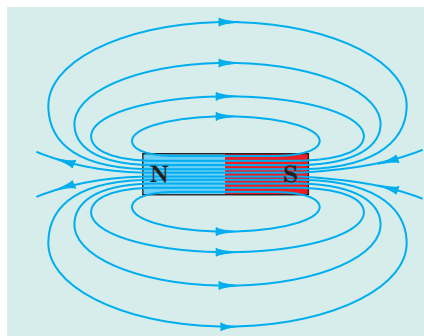
$$[B] = 1 \text{ Тл}^*.$$

За направление вектора магнитной индукции в данной точке магнитного поля принято направление, на которое указывает северный полюс магнитной стрелки, установленной в этой точке (рис. 2.2).

*Обратите внимание!* Направление силы, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы или на проводник с током, или на магнитную стрелку, не совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

\* Как выразить 1 Тл через другие единицы СИ, по какой формуле можно определить модуль магнитной индукции, как направлена сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, вы узнаете из материала § 4.





### Магнитные линии:

- вне магнита выходят из северного полюса магнита и входят в южный;
- всегда замкнуты (магнитное поле — это вихревое поле);
- наиболее густо расположены у полюсов магнита;
- никогда не пересекаются

Рис. 2.3. Линии магнитного поля полосового магнита

## 2 Изображаем магнитное поле

На рис. 2.2 видим, как ориентируются магнитные стрелки в магнитном поле: их оси как будто образуют линии, а вектор магнитной индукции в каждой точке направлен вдоль касательной к линии, проходящей через эту точку.

Условные направленные линии, в каждой точке которых касательная совпадает с линией, вдоль которой направлен вектор магнитной индукции, называют **линиями магнитной индукции** или **магнитными линиями**.

С помощью магнитных линий графически изображают магнитные поля:

- 1) за направление линии магнитной индукции в данной точке принято направление вектора магнитной индукции;
- 2) чем больше модуль магнитной индукции, тем ближе друг к другу чертят магнитные линии.

Рассмотрев графическое изображение магнитного поля полосового магнита, можно сделать некоторые выводы (см. на рис. 2.3). Заметим, что данные выводы справедливы для магнитных линий любого магнита.

**?** Какое направление имеют магнитные линии внутри полосового магнита?

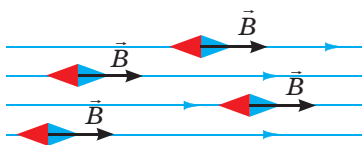
Картину магнитных линий можно воспроизвести с помощью железных опилок. Возьмем подковообразный магнит, положим на него пластинку из оргстекла и через ситечко будем насыпать на пластинку железные опилки. В магнитном поле каждый кусочек железа намагнитится и превратится в маленькую «магнитную стрелку». Импровизированные «стрелки» сориентируются вдоль магнитных линий магнитного поля магнита (рис. 2.4).

**?** Изобразите картину магнитных линий магнитного поля подковообразного магнита.

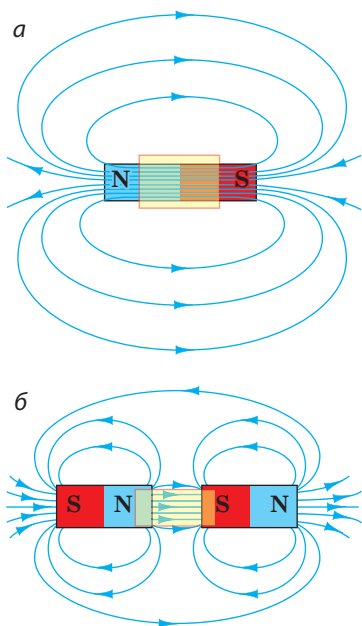


Рис. 2.4. Цепочки железных опилок воспроизводят картину линий магнитной индукции магнитного поля подковообразного магнита

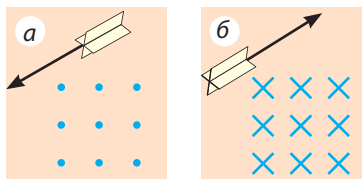




**Рис. 2.5.** Участок, на котором магнитное поле однородно



**Рис. 2.6.** Магнитное поле внутри полосового магнита (а) и между двумя магнитами, обращенными друг к другу разноименными полюсами (б), можно считать однородным



**Рис. 2.7.** Изображение линий магнитной индукции однородного магнитного поля, которые перпендикулярны плоскости рисунка и направлены к нам (а); направлены от нас (б)

### 3 Узнаём об однородном магнитном поле

Магнитное поле в некоторой части пространства называют **однородным**, если в каждой его точке *векторы магнитной индукции одинаковы как по модулю, так и по направлению* (рис. 2.5).

На участках, где магнитное поле однородно, линии магнитной индукции параллельны и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 2.5, 2.6). Магнитные линии однородного магнитного поля, направленные к нам, принято изображать точками (рис. 2.7, а) — мы как будто видим «острия стрел», летящих к нам. Если магнитные линии направлены от нас, то их изображают крестиками — мы как будто видим «оперения стрел», летящих от нас (рис. 2.7, б).

В большинстве случаев мы имеем дело с *неоднородным магнитным полем*, — полем, в разных точках которого векторы магнитной индукции имеют разные значения и направления. Магнитные линии такого поля искривлены, а их плотность разная.

### 4 Изучаем магнитное поле Земли

Для изучения земного магнетизма Вильям Гильберт изготовил постоянный магнит в виде шара (модель Земли). Расположив на шаре компас, он заметил, что стрелка компаса ведет себя так же, как на поверхности Земли.

Эксперименты позволили ученому предположить, что *Земля — это огромный магнит, а на севере нашей планеты расположен ее южный магнитный полюс*. Дальнейшие исследования подтвердили гипотезу В. Гильберта.

На рис. 2.8 изображена картина линий магнитной индукции магнитного поля Земли.



Представьте, что вы идете к Северному полюсу, двигаясь точно в том направлении, на которое указывает стрелка компаса. Достигнете ли вы места назначения?

*Линии магнитной индукции магнитного поля Земли не параллельны ее поверхности. Если закрепить магнитную стрелку в карданном подвесе, то есть так, чтобы она могла свободно вращаться как вокруг горизонтальной, так*

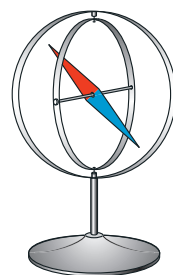


**Рис. 2.8.** Схема расположения магнитных линий магнитного поля планеты Земля

и вокруг вертикальной осей, стрелка установится под углом к поверхности Земли (рис. 2.9).

**?** Как будет расположена магнитная стрелка в устройстве на рис. 2.9 вблизи северного магнитного полюса Земли? вблизи южного магнитного полюса Земли?

Магнитное поле Земли издавна помогало ориентироваться путешественникам, морякам, военным и не только им. Доказано, что рыбы, морские млекопитающие и птицы во время своих миграций ориентируются по магнитному полю Земли. Так же ориентируются, ища путь домой, и некоторые животные, например кошки.

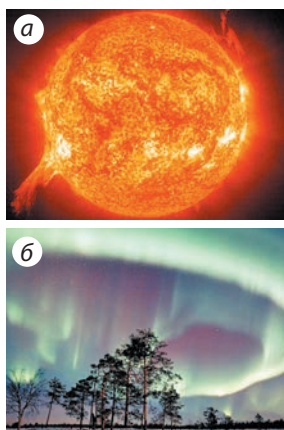


**Рис. 2.9.** Магнитная стрелка в карданном подвесе

## 5 Узнаём о магнитных бурях

Исследования показали, что в любой местности магнитное поле Земли периодически, каждые сутки, изменяется. Кроме того, наблюдаются небольшие ежегодные изменения магнитного поля Земли. Случаются, однако, и резкие его изменения. Сильные возмущения магнитного поля Земли, которые охватывают всю планету и продолжаются от одного до нескольких дней, называют *магнитными бурями*. Здоровые люди их практически не ощущают, а вот у тех, кто имеет сердечно-сосудистые заболевания и заболевания нервной системы, магнитные бури вызывают ухудшение самочувствия.

Магнитное поле Земли — своеобразный «щит», который защищает нашу планету от летящих из космоса, в основном от Солнца («солнечный ветер»), заряженных частиц. Вблизи магнитных полюсов потоки частиц подлетают довольно близко к атмосфере Земли. При возрастании солнечной активности космические частицы попадают в верхние слои атмосферы и ионизируют молекулы газа — на Земле наблюдаются полярные сияния (рис. 2.10).



**Рис. 2.10.** При возрастании солнечной активности увеличивается площадь темных пятен на Солнце (а), а на Земле происходят магнитные бури и полярные сияния (б)



### Подводим итоги

Магнитная индукция  $\vec{B}$  — это векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением, на которое указывает северный полюс магнитной стрелки. Единица магнитной индукции в СИ — тесла (Тл).

Условные направленные линии, в каждой точке которых касательная совпадает с линией, вдоль которой направлен вектор магнитной индукции, называют линиями магнитной индукции или магнитными линиями.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, вне магнита они выходят из северного полюса магнита и входят в южный, гуще расположены в тех областях магнитного поля, где модуль магнитной индукции больше.

Планета Земля имеет магнитное поле. Вблизи северного географического полюса Земли расположен ее южный магнитный полюс, вблизи южного географического полюса — северный магнитный полюс.



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение магнитной индукции.
2. Как направлен вектор магнитной индукции?
3. Какова единица магнитной индукции в СИ? В честь кого она названа?
4. Приведите определение линий магнитной индукции.
5. Какое направление принято за направление магнитных линий?
6. От чего зависит густота магнитных линий?
7. Какое магнитное поле называют однородным?
8. Докажите, что Земля имеет магнитное поле.
9. Как расположены магнитные полюсы Земли относительно географических?
10. Что такое магнитные бури? Как они влияют на человека?



### Упражнение № 2

1. На рис. 1 изображены линии магнитной индукции на некотором участке магнитного поля. Для каждого случая а–в определите: 1) какое это поле — однородное или неоднородное; 2) направление вектора магнитной индукции в точках А и В поля; 3) в какой точке — А или В — магнитная индукция поля больше.
2. Почему стальная оконная решетка может со временем намагнититься?
3. На рис. 2 изображены линии магнитного поля, созданного двумя одинаковыми постоянными магнитами, обращенными друг к другу противоположными полюсами.

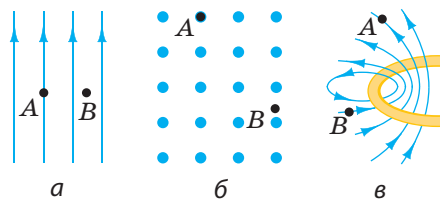


Рис. 1

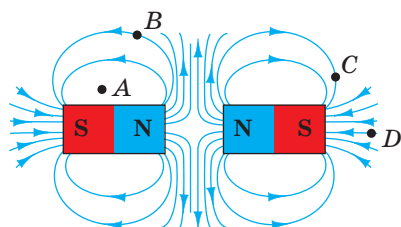


Рис. 2

- 1) Существует ли магнитное поле в точке  $A$ ?
- 2) Каково направление вектора магнитной индукции в точке  $B$ ? в точке  $C$ ?
- 3) В какой точке —  $A$ ,  $B$  или  $C$  — магнитная индукция поля наибольшая?
- 4) Каково направление векторов магнитной индукции внутри магнитов?
4. Раньше во время экспедиций на Северный полюс возникали трудности в определении направления движения, ведь вблизи полюса обычные компасы почти не работали. Как вы думаете, почему?
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и выясните, какое значение имеет магнитное поле для жизни на нашей планете. Что произошло бы, если бы магнитное поле Земли вдруг исчезло?
6. Существуют участки земной поверхности, где магнитная индукция магнитного поля Земли значительно больше, чем в соседних областях. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о магнитных аномалиях подробнее.
7. Объясните, почему любое незаряженное тело всегда притягивается к телу, имеющему электрический заряд.



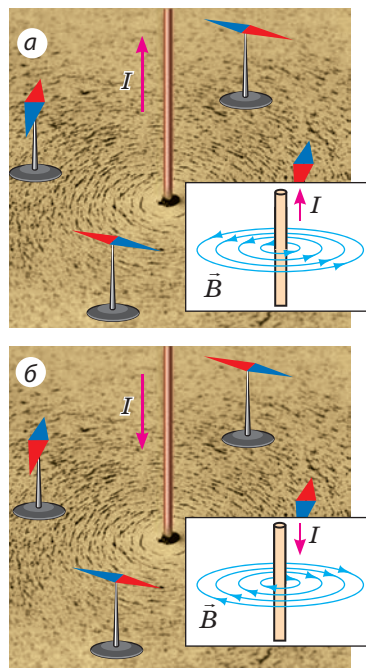
## § 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА. ПРАВИЛО БУРАВЧИКА

Вы уже знаете, что около проводника с током существует магнитное поле. Исследуем магнитное поле прямого проводника с током. Для этого пропустим проводник через лист картона (перпендикулярно листу), насыпем на картон железные опилки и замкнем цепь. В магнитном поле проводника опилки намагнитятся и воссоздадут картину линий магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током — концентрические окружности, охватывающие проводник (см. [рис. 3.1](#)). А как определить направление магнитных линий?

### 1 Знакомимся с правилом буравчика

Расположим рядом с проводником несколько магнитных стрелок и пустим в проводнике ток — стрелки сориентируются в магнитном поле проводника ([рис. 3.1, а](#)). Северный полюс каждой стрелки укажет направление вектора индукции магнитного поля в данной точке, а значит, и направление магнитных линий этого поля.

С изменением направления тока в проводнике изменится и ориентация магнитных стрелок ([рис. 3.1, б](#)). Это означает, что *направление магнитных линий зависит от направления тока в проводнике*.



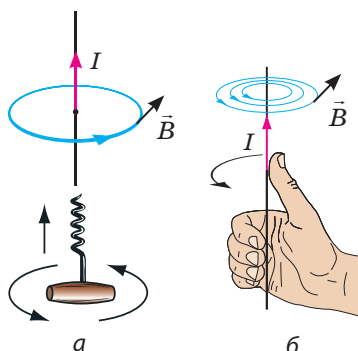
**Рис. 3.1.** Определение направления линий магнитной индукции магнитного поля проводника с током с помощью магнитных стрелок

Определять направление линий магнитной индукции с помощью магнитной стрелки не всегда удобно, поэтому используют **правило буравчика**:

Если вкручивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика укажет направление магнитных линий магнитного поля тока (рис. 3.2, а);

или иначе:

Если направить большой палец правой руки по направлению тока в проводнике, то четыре согнутых пальца укажут направление магнитных линий магнитного поля тока (рис. 3.2, б).



**Рис. 3.2.** Определение направления линий магнитного поля проводника с током с помощью правила буравчика

**?** Убедитесь в справедливости правила буравчика для случаев, представленных на рис. 3.1.

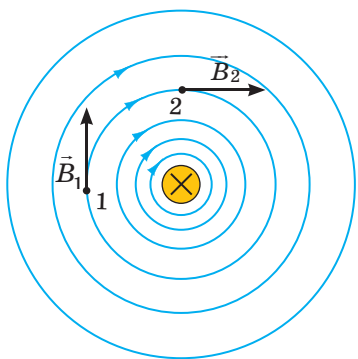
## 2 Выясняем, от чего зависит модуль индукции магнитного поля проводника с током

Вспомните: магнитное действие проводника с током первым обнаружил Х. Эрстед в 1820 г. А вот почему это открытие не было сделано раньше? Дело в том, что с увеличением расстояния от проводника магнитная индукция созданного им поля быстро уменьшается. Поэтому, если магнитная стрелка расположена не вблизи проводника с током, магнитное действие тока почти незаметно.

**?** Рассмотрите рис. 3.3. Почему с увеличением расстояния от проводника плотность линий магнитной индукции уменьшается? Равны ли модули векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ ?

Магнитная индукция зависит также от силы тока: с увеличением силы тока в проводнике магнитная индукция созданного им магнитного поля увеличивается.

## 3 Изучаем магнитное поле катушки с током



**Рис. 3.3.** Линии магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током. Проводник расположен перпендикулярно плоскости рисунка; крестик (x) означает, что сила тока в проводнике направлена от нас

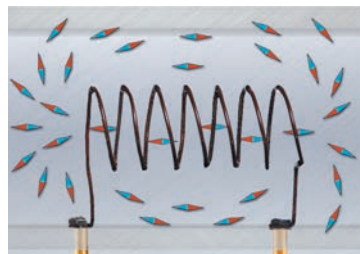
Свернем изолированный провод в катушку и пустим по проводу ток. Если теперь вокруг катушки разместить магнитные стрелки, то к одному торцу катушки стрелки повернутся северным полюсом, а к другому — южным (рис. 3.4). Это означает, что около катушки с током существует магнитное поле.



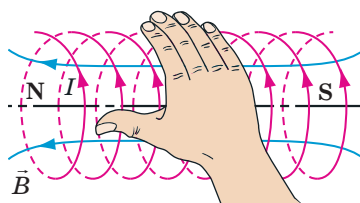
Как и полосовой магнит, катушка с током имеет два полюса — южный и северный. *Полюсы катушки расположены на ее торцах, и их легко определить с помощью правой руки:*

Если четыре согнутых пальца правой руки направить по направлению тока в катушке, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление на северный полюс катушки, то есть направление вектора магнитной индукции внутри катушки (рис. 3.5).

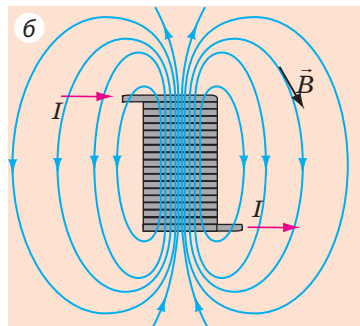
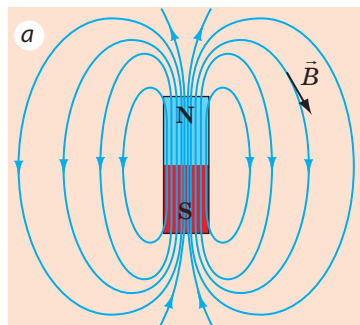
Сравнив магнитные линии постоянного полосового магнита и катушки с током, увидим, что они очень похожи (рис. 3.6). Заметим: магнитная стрелка, подвешенная катушка с током и подвешенный полосовой магнит ориентируются в магнитном поле Земли одинаково.



**Рис. 3.4.** Исследование магнитного поля катушки с током с помощью магнитных стрелок



**Рис. 3.5.** Определение полюсов катушки с током с помощью правой руки



**Рис. 3.6.** Линии магнитной индукции магнитного поля полосового магнита (а) и катушки с током (б)



### Подводим итоги

Около проводника с током существует магнитное поле. Магнитная индукция поля, созданного током, уменьшается с увеличением расстояния от проводника и увеличивается с увеличением силы тока в проводнике.

Направление линий магнитной индукции магнитного поля проводника с током можно определить с помощью магнитных стрелок или правила буравчика.

Катушка с током, как и постоянный магнит, имеет два полюса. Их можно определить с помощью правой руки: если четыре согнутых пальца правой руки направить по направлению тока в катушке, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление на ее северный полюс.



### Контрольные вопросы

1. Как определить направление линий магнитной индукции магнитного поля проводника с током?
2. Сформулируйте правило буравчика.
3. Как магнитная индукция магнитного поля проводника с током зависит от расстояния до проводника? от силы тока в проводнике?
4. Какой вид имеют линии магнитной индукции магнитного поля прямого проводника с током? катушки с током?
5. Как определить магнитные полюсы катушки с током?



### Упражнение № 3

1. На рис. 1 изображена линия магнитной индукции магнитного поля проводника с током. Определите направление тока в проводнике.
2. На рис. 2 изображены линии магнитной индукции магнитных полей двух проводников с током. Определите: 1) направление магнитного поля проводника на рис. 2, а; 2) направление тока в проводнике на рис. 2, б; 3) в какой точке — *A* или *B* — магнитное поле сильнее (рис. 2, а, б).
3. Каким полюсом должна повернуться к нам магнитная стрелка (рис. 3)? Изменится ли ответ, если стрелку расположить над проводником?
4. Над катушкой подвешен магнит (рис. 4). Как будет вести себя магнит, если замкнуть цепь?
5. Определите полюсы источника тока на рис. 5.
6. В некоторых приборах проявления магнитного поля тока нежелательны. В таких приборах используется *бифилярная намотка*: провод скручивают вдвое так, чтобы оба его конца оказались рядом. В чем смысл такой намотки?

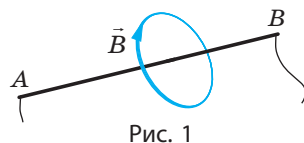


Рис. 1

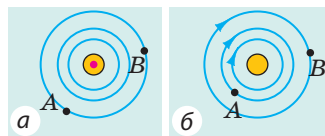


Рис. 2

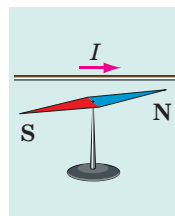


Рис. 3

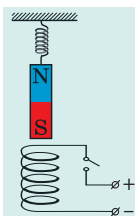


Рис. 4

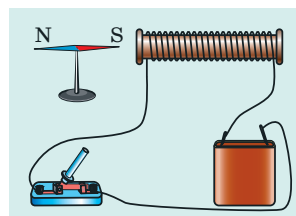


Рис. 5

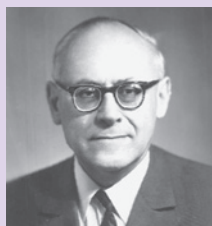


### Экспериментальное задание

«Электромагнитный компас». Склейте бумажный цилиндр диаметром 7–10 мм и длиной 4–5 см. На полученный каркас намотайте 20–30 витков тонкого изолированного провода.

Полученную катушку закрепите горизонтально на небольшой дощечке (или пробке), концы провода соедините с батареей гальванических элементов. Определите полюсы катушки, отметьте их. Опустите дощечку в широкий сосуд с водой. Электромагнитный компас готов. Как он будет действовать? Вставьте в катушку железный гвоздь. Будет ли теперь компас работать правильно?

### Физика и техника в Украине



**Александр Ильич Ахиезер** (1911–2000) — выдающийся украинский физик-теоретик, академик НАНУ, основатель научной школы теоретической физики. Среди его учеников — академики В. Г. Барьяхтар, Д. В. Волков, С. В. Пелетминский, А. Г. Ситенко и более 30 членов-корреспондентов и докторов наук.

Исследуя взаимодействие ультразвука с кристаллами, А. И. Ахиезер разработал механизм поглощения, обусловленный модуляцией энергии квазичастицы внешним полем, который получил название «механизм Ахиезера». Ученый является автором теории резонансных ядерных реакций, получил фундаментальные результаты при исследовании физики плазмы, вместе с учениками сформулировал основы электродинамики плазмы. Совместно с В. Г. Барьяхтаром и С. В. Пелетминским ученый открыл новое явление — магнитоакустический резонанс.

Имя А. И. Ахиезера носит Институт теоретической физики — структурное подразделение Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт».



## § 4. СИЛА АМПЕРА

Из § 1 вы узнали, что магнитное поле действует на проводник с током с некоторой силой. А из курса физики 8 класса помните, что сила — это векторная физическая величина, поэтому, чтобы полностью определить силу, нужно уметь рассчитывать ее значение и определять направление. От чего зависит значение силы, с которой магнитное поле действует на проводник с током, как направлена эта сила и почему ее называют силой Ампера, вы узнаете из данного параграфа.

### 1 Характеризуем силу, действующую на проводник с током

Между полюсами подковообразного постоянного магнита подвесим на тонких и гибких проводах прямой алюминиевый проводник (рис. 4.1, а). Если через проводник пропустить ток, проводник отклонится от положения равновесия (рис. 4.1, б). Причина такого отклонения — сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля. Доказал наличие этой силы и выяснил, от чего зависят ее значение и направление, А. Ампер. Именно потому эту силу называют *силой Ампера*.

**Сила Ампера** — это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

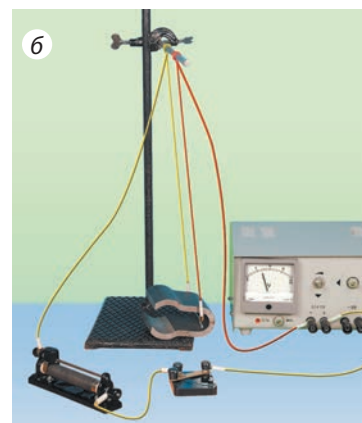
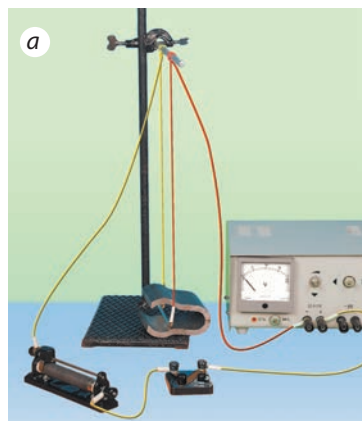
Сила Ампера прямо пропорциональна силе тока в проводнике и длине активной части проводника (то есть части, расположенной в магнитном поле). Сила Ампера увеличивается с увеличением индукции магнитного поля и зависит от того, под каким углом к линиям магнитной индукции расположен проводник.

Значение силы Ампера ( $F_A$ ) вычисляют по формуле:

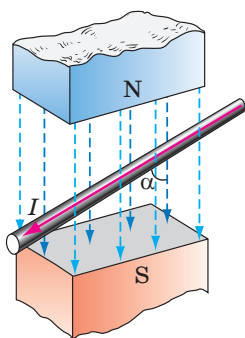
$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

где  $B$  — магнитная индукция магнитного поля;  $I$  — сила тока в проводнике;  $l$  — длина активной части проводника;  $\alpha$  — угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике (рис. 4.2).

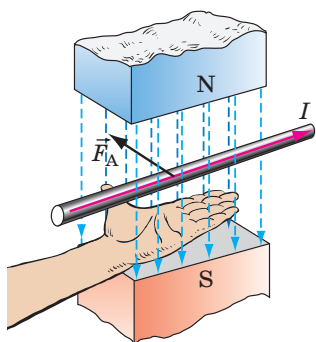
**Обратите внимание!** Магнитное поле не будет действовать на проводник с током ( $F_A = 0$ ), если проводник расположен параллельно магнитным линиям поля ( $\sin \alpha = 0$ ).



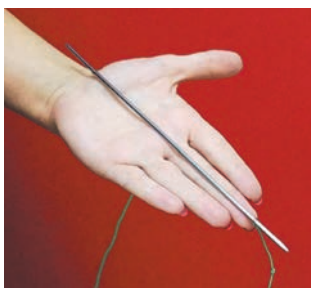
**Рис. 4.1.** Опыт, демонстрирующий действие магнитного поля на алюминиевый проводник: при отсутствии тока магнитное поле на проводник не действует (а); если в проводнике течет ток, на проводник действует магнитное поле и проводник отклоняется (б)



**Рис. 4.2.** Угол  $\alpha$  — это угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике



**Рис. 4.3.** Определение направления силы Ампера по правилу левой руки



**Рис. 4.4.** К заданию в § 4

Чтобы определить направление силы Ампера, используют **правило левой руки**:

Если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера (рис. 4.3).

**?** На рис. 4.4 показано определение направления силы Ампера, действующей на проводник, расположенный в однородном магнитном поле. Определите направление тока в проводнике, направление магнитной индукции и направление силы Ампера.

## 2 Получаем формулу для определения модуля магнитной индукции

Если проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$ ), поле действует на проводник с максимальной силой:

$$F_{A\max} = BIl$$

Отсюда получаем **формулу для определения модуля магнитной индукции**:

$$B = \frac{F_{A\max}}{Il}$$

*Обратите внимание!* Значение магнитной индукции не зависит ни от силы тока в проводнике, ни от длины проводника, а *зависит только от свойств магнитного поля*.

Например, если уменьшить силу тока в проводнике, то уменьшится и сила Ампера, с которой магнитное поле действует на проводник, а вот значение магнитной индукции останется неизменным.

В СИ единица магнитной индукции — тесла (Тл), единица силы — ньютон (Н), силы тока — ампер (А), длины — метр (м), поэтому:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

1 Тл — это индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с максимальной силой 1 Н на проводник длиной 1 м, в котором течет ток силой 1 А.

### 3 Учимся решать задачи

**Задача 1.** Докажите, что два параллельных проводника, в которых текут токи одного направления, притягиваются.

*Анализ физической проблемы.* Около любого проводника с током существует магнитное поле, следовательно, каждый из двух проводников находится в магнитном поле другого. На первый проводник действует сила Ампера со стороны магнитного поля, созданного током во втором проводнике, и наоборот. Определив по правилу левой руки направления этих сил, выясним, как будут вести себя проводники.

#### Решение

Решая задачу, выполним пояснительные рисунки: изобразим проводники  $A$  и  $B$ , покажем направления тока в них и т. д.

Выясним направление силы Ампера, которая действует на проводник  $A$ , находящийся в магнитном поле проводника  $B$ .

1) С помощью правила буравчика найдем направление линий магнитной индукции магнитного поля, созданного проводником  $B$  (рис. 1, *а*). Выясняется, что вблизи проводника  $A$  магнитные линии направлены к нам (обозначено «•»).

2) Воспользовавшись правилом левой руки, определим направление силы Ампера, действующей на проводник  $A$  со стороны магнитного поля проводника  $B$  (рис. 1, *б*).

3) Приходим к выводу: проводник  $A$  притягивается к проводнику  $B$ .

Теперь выясним направление силы Ампера, которая действует на проводник  $B$ , находящийся в магнитном поле проводника  $A$ .

1) Определим направление линий магнитной индукции магнитного поля, созданного проводником  $A$  (рис. 2, *а*). Выясняется, что вблизи проводника  $B$  магнитные линии направлены от нас (обозначено «×»).

2) Определим направление силы Ампера, действующей на проводник  $B$  (рис. 2, *б*).

3) Приходим к выводу: проводник  $B$  притягивается к проводнику  $A$ .

*Ответ:* два параллельных проводника, в которых текут токи одного направления, притягиваются.

**Задача 2.** Прямой проводник (стержень) длиной 0,1 м и массой 40 г находится в горизонтальном однородном магнитном поле индукцией 0,5 Тл. Стержень расположен перпендикулярно магнитным линиям поля (рис. 3).

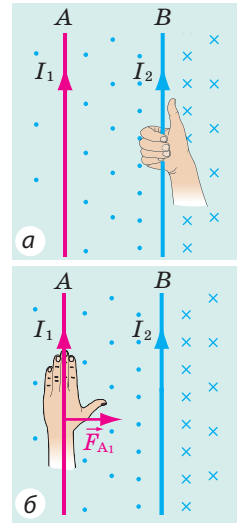


Рис. 1

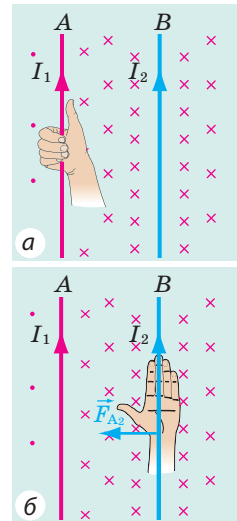


Рис. 2

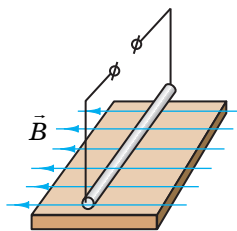


Рис. 3

Ток какой силы и в каком направлении следует пропустить по стержню, чтобы стержень не давил на опору (завис в магнитном поле)?

*Анализ физической проблемы.* Стержень не будет давить на опору, если сила Ампера уравнивает силу тяжести. Это произойдет при условиях: 1) сила Ампера будет направлена противоположно силе тяжести (то есть вертикально вверх); 2) значение силы Ампера будет равно значению силы тяжести:  $F_A = F_{\text{тяж}}$ .

Направление тока определим, воспользовавшись правилом левой руки.

*Дано:*

$$\begin{aligned} l &= 0,1 \text{ м} \\ m &= 40 \text{ г} = 0,04 \text{ кг} \\ B &= 0,5 \text{ Тл} \\ \alpha &= 90^\circ \\ g &= 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

*Найти:*

$I$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

1. Определим направление тока. Для этого расположим левую руку так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый на  $90^\circ$  большой палец был направлен вертикально вверх. Четыре вытянутых пальца укажут направление от нас. Следовательно, ток в проводнике нужно направить от нас.

2. Учитываем, что  $F_A = F_{\text{тяж}}$ .

$$F_A = BIl \sin \alpha, \text{ где } \sin \alpha = 1; F_{\text{тяж}} = mg.$$

Следовательно,  $BIl = mg$ .

$$\text{Из последнего выражения найдем силу тока: } I = \frac{mg}{Bl}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины.

$$\text{Вспомним: } \text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}; [I] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \text{А}, \quad I = \frac{0,04 \cdot 10}{0,5 \cdot 0,1} = \frac{40}{5} = 8 \text{ (А)}.$$

*Ответ:*  $I = 8 \text{ А}$ ; от нас.



### Подводим итоги

Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называют силой Ампера. Значение силы Ампера находят по формуле:  $F_A = BIl \sin \alpha$ , где  $B$  — индукция магнитного поля;  $I$  — сила тока в проводнике;  $l$  — длина активной части проводника;  $\alpha$  — угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы Ампера.



### Контрольные вопросы

1. Опишите опыт, подтверждающий, что в магнитном поле на проводник с током действует сила. 2. Дайте определение силы Ампера. 3. От чего зависит значение силы Ампера? По какой формуле ее определяют? 4. Как следует расположить проводник, чтобы сила Ампера была наибольшей? Когда магнитное поле не действует на проводник? 5. Сформулируйте правило для определения направления силы Ампера. 6. Приведите формулу для определения модуля магнитной индукции. 7. Дайте определение единицы магнитной индукции.



### Упражнение № 4

- На рис. 1 показано направление тока в проводнике и направление линий магнитной индукции магнитного поля для нескольких случаев. Определите направление силы Ампера для каждого случая а–г.

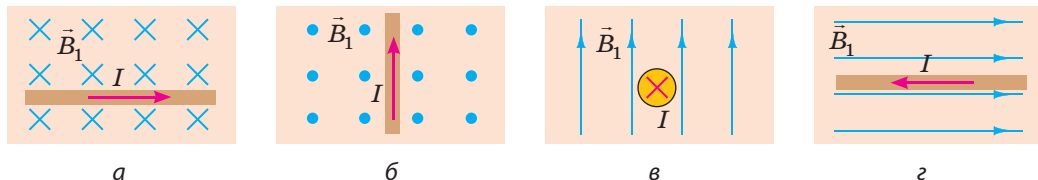


Рис. 1

- В прямолинейном проводнике длиной 60 см течет ток силой 1,2 А. Проводник расположен в однородном магнитном поле индукцией 1,5 Тл. Определите наибольшее и наименьшее значения силы Ампера, которая может действовать на проводник.
- Проводник с током отклоняется в магнитном поле постоянного магнита. Определите: а) полюсы магнита (рис. 2); б) полюсы источника тока (рис. 3).
- В однородном магнитном поле индукцией 40 мТл на прямолинейный проводник с током 2,5 А действует сила Ампера 60 мН. Определите: а) длину проводника, если он расположен под углом  $30^\circ$  к линиям магнитной индукции; б) работу, которую выполнило магнитное поле, если под действием силы Ампера проводник переместился на 0,5 м в направлении действия этой силы.
- Докажите, что два проводника, в которых текут токи противоположных направлений, отталкиваются.
- Горизонтальный проводник массой 5 г и длиной 10 см лежит на рельсах в вертикальном магнитном поле индукцией 25 мТл (рис. 4). Определите: а) в каком направлении будет двигаться проводник, если замкнуть электрическую цепь; б) коэффициент трения, если при силе тока в проводнике 5 А проводник движется прямолинейно равномерно.
- Составьте задачу, обратную задаче 2 в пункте 3 § 4.

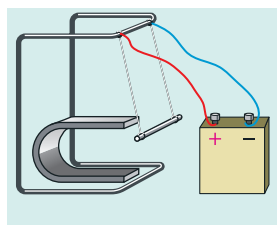


Рис. 2

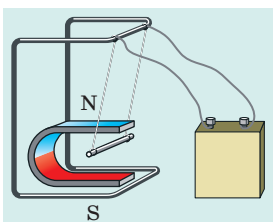


Рис. 3

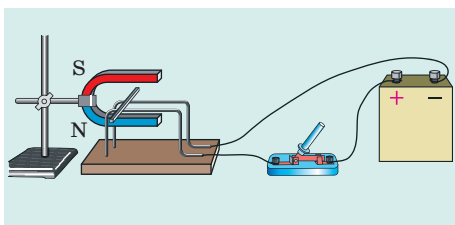


Рис. 4



### Экспериментальное задание

«Соленый двигатель». Подвесьте к мягкой металлической пружине железный гвоздь; острие гвоздя опустите в раствор поваренной соли так, чтобы оно только касалось жидкости (см. рис. 5). Соберите электрическую цепь, как показано на рис. 5. Замкните цепь — гвоздь начнет колебаться, разомкните цепь — колебания быстро прекратятся. Объясните наблюдаемое явление.

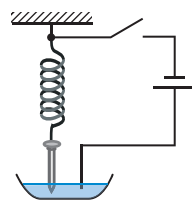


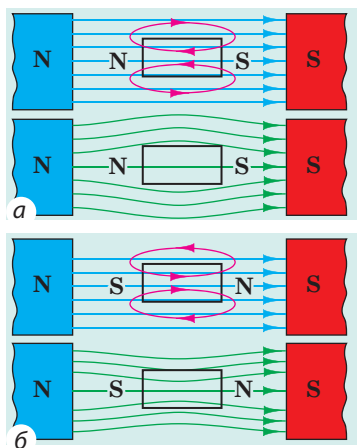
Рис. 5

## § 5. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ. ГИПОТЕЗА АМПЕРА

Наверное, каждый из вас видел магниты и даже исследовал их свойства. Если поднести магнит к кучке мелких предметов, некоторые из них (гвоздики, кнопки, скрепки) притянутся к магниту, а некоторые (кусочки мела, медные и алюминиевые монетки, комочки земли) никак не отреагируют. Почему так? Действительно ли магнитное поле не оказывает никакого влияния на некоторые вещества? Именно об этом пойдет речь в параграфе.



**Рис. 5.1.** В результате действия электрического поля отрицательно заряженной палочки ближняя к ней часть проводящей сферы приобретает положительный заряд



**Рис. 5.2.** Образцы из диамагнетика (а) и парамагнетика (б) во внешнем магнитном поле: красные линии — линии магнитного поля, созданного образцом; синие — магнитные линии внешнего магнитного поля; зеленые — линии результирующего магнитного поля

### 1 Сравниваем действия электрического и магнитного полей на вещество

Изучая в 8 классе электрические явления, вы узнали, что под влиянием внешнего электрического поля происходит перераспределение электрических зарядов внутри незаряженного тела (рис. 5.1). В результате в теле образуется собственное электрическое поле, направленное противоположно внешнему, и именно поэтому электрическое поле в веществе всегда ослабляется.

Вещество изменяет и магнитное поле. Есть вещества, которые (как в случае с электрическим полем) ослабляют магнитное поле внутри себя. Такие вещества называют *диамагнетиками*. Многие вещества, наоборот, усиливают магнитное поле — это *парамагнетики* и *ферромагнетики*.

Дело в том, что любое вещество, помещенное в магнитное поле, намагничивается, то есть создает собственное магнитное поле, магнитная индукция которого разная для разных веществ.

### 2 Узнаём о слабомагнитных веществах

Вещества, которые намагничиваются, создавая слабое магнитное поле, магнитная индукция которого намного меньше магнитной индукции внешнего магнитного поля (то есть поля, вызвавшего намагничивание), называют *слабомагнитными веществами*. К таким веществам относятся диамагнетики и парамагнетики.

**Диамагнетики** (от греч. *dia* — расхождение) намагничиваются, создавая слабое магнитное поле, направленное противоположно внешнему магнитному полю (рис. 5.2, а). Именно поэтому диамагнетики незначительно ослабляют внешнее магнитное поле: магнитная индукция магнитного поля внутри



диамагнетика ( $B_d$ ) немного меньше магнитной индукции внешнего магнитного поля ( $B_0$ ):

$$B_d \leq B_0; \quad \frac{B_d}{B_0} \approx 0,9998$$

Если диамагнетик поместить в магнитное поле, он будет выталкиваться из него (рис. 5.3).

**?** Почему диамагнитное вещество выталкивается из магнитного поля (рис. 5.2, а)?

К диамагнетикам относятся инертные газы (гелий, неон и др.), многие металлы (золото, медь, ртуть, серебро и др.), молекулярный азот, вода и т. д. Тело человека — диамагнетик, так как оно в среднем на 78 % состоит из воды.

**Парамагнетики** (от греч. *para* — рядом) намагничиваются, создавая слабое магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и внешнее магнитное поле (рис. 5.2, б). Парамагнетики незначительно усиливают внешнее поле: магнитная индукция магнитного поля внутри парамагнетика ( $B_p$ ) немного больше магнитной индукции внешнего магнитного поля ( $B_0$ ):

$$B_p \geq B_0; \quad \frac{B_p}{B_0} \approx 1,001$$

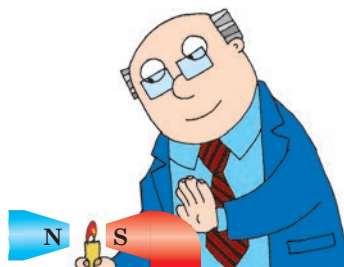
К парамагнетикам относятся кислород, платина, алюминий, щелочные и щелочноземельные металлы и другие вещества. Если парамагнитное вещество поместить в магнитное поле, то оно будет втягиваться в это поле.

### 3 Изучаем ферромагнетики

Если слабомагнитные вещества извлечь из магнитного поля, их намагниченность сразу исчезнет. Иначе происходит с *сильномагнитными веществами* — **ферромагнетиками**.

**Ферромагнетики** (от лат. *ferrum* — железо) — вещества или материалы, которые остаются намагниченными и при отсутствии внешнего магнитного поля.

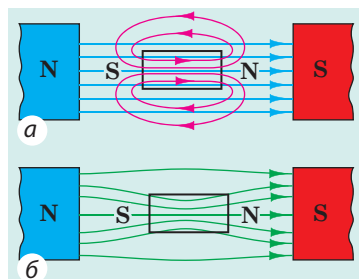
Ферромагнетики намагничиваются, создавая *сильное магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и внешнее магнитное поле* (рис. 5.4, 5.5, а). Если изготовленное из ферромагнетика тело поместить в магнитное поле, оно будет втягиваться в него (рис. 5.5, б).



**Рис. 5.3.** Пламя свечи выталкивается из магнитного поля, так как продукты сгорания — диамагнитные частицы



**Рис. 5.4.** Железный гвоздь намагничивается в магнитном поле так, что конец гвоздя, расположенный вблизи северного полюса магнита, становится южным полюсом, поэтому гвоздь притягивается к магниту



**Рис. 5.5.** Ферромагнетики создают сильное магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и внешнее магнитное поле (а); линии магнитной индукции как будто втягиваются в ферромагнитный образец (б)





Рис. 5.6. К заданию в § 5

Температура Кюри  
для некоторых  
ферромагнетиков

Вещество (или материал)	Темпе- ратура, °C
Гадолиний	+19
Железо	+770
Кобальт	+1127
Неодимовый магнит NdFeB	+320
Никель	+354

? Почему на постоянном магните удерживаются только предметы, изготовленные из ферромагнитных материалов (рис. 5.6)?

К ферромагнетикам относится небольшая группа веществ: железо, никель, кобальт, редкоземельные вещества и ряд сплавов. Ферромагнетики значительно усиливают внешнее магнитное поле: магнитная индукция магнитного поля внутри ферромагнетиков ( $B_{\Phi}$ ) в сотни и тысячи раз больше магнитной индукции внешнего магнитного поля ( $B_0$ ):

$$B_{\Phi} \gg B_0$$

Так, кобальт усиливает магнитное поле в 175 раз, никель — в 1120 раз, а трансформаторная сталь (на 96–98 % состоит из железа) — в 8000 раз.

Ферромагнитные материалы условно делят на два типа. Материалы, которые после прекращения действия внешнего магнитного поля остаются намагниченными длительное время, называют *магнитожесткими ферромагнетиками*. Их применяют для изготовления постоянных магнитов. Ферромагнитные материалы, которые легко намагничиваются и быстро размагничиваются, называют *магнитомягкими ферромагнетиками*. Их применяют для изготовления сердечников электромагнитов, двигателей, трансформаторов, то есть устройств, которые во время работы постоянно перемагничиваются (о строении и принципе действия таких устройств вы узнаете позже).

**Обратите внимание!** При достижении *температуры Кюри* (см. таблицу) ферромагнитные свойства магнитомягких и магнитожестких материалов исчезают — материалы становятся парамагнетиками.

#### 4 Знакомимся с гипотезой Ампера

Наблюдая действие проводника с током на магнитную стрелку (см. рис. 1.1) и выяснив, что катушки с током ведут себя как постоянные магниты (см. рис. 1.3), А. Ампер выдвинул гипотезу о магнитных свойствах веществ. Ампер предположил, что внутри веществ существует огромное количество незатухающих малых круговых токов и каждый из них, как маленькая катушка, является магнитиком. Постоянный магнит состоит из множества таких элементарных магнитиков, ориентированных в определенном направлении.

Механизм намагничивания веществ Ампер объяснял так. Если тело не намагничено, круговые токи ориентированы беспорядочно (рис. 5.7, а). Внешнее магнитное поле пытается сориентировать эти токи так, чтобы направление магнитного поля каждого тока совпадало с направлением внешнего



**Рис. 5.7.** Механизм намагничивания тел согласно гипотезе Ампера: *а* — круговые токи ориентированы беспорядочно, тело не намагничено; *б* — круговые токи ориентированы в определенном направлении, тело намагничено

магнитного поля (рис. 5.7, б). У некоторых веществ такая ориентация токов (намагничивание) остается и после прекращения действия внешнего магнитного поля. Таким образом, все магнитные явления Ампер объяснял взаимодействием движущихся заряженных частиц.

Гипотеза Ампера послужила толчком к созданию теории магнетизма. На основе этой гипотезы были объяснены известные свойства ферромагнетиков, однако она не могла объяснить природу диа- и парамагнетизма, а также то, почему только небольшое количество веществ имеет ферромагнитные свойства. Современная теория магнетизма основана на законах квантовой механики и теории относительности А. Эйнштейна.



### Подводим итоги

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, намагничивается, то есть создает собственное магнитное поле.

Диамагнетики	Парамагнетики	Ферромагнетики
Намагничиваются, создавая слабое магнитное поле, направленное противоположно внешнему магнитному полю	Намагничиваются, создавая слабое магнитное поле, направленное в сторону внешнего магнитного поля	Намагничиваются, создавая сильное магнитное поле, направленное в сторону внешнего магнитного поля; остаются намагничеными после прекращения действия внешнего магнитного поля
Незначительно ослабляют внешнее магнитное поле, выталкиваются из него	Незначительно усиливают внешнее магнитное поле, втягиваются в него	Усиливают внешнее магнитное поле в сотни и тысячи раз, втягиваются в него
Инертные газы, медь, золото, ртуть, серебро, азот, вода и др.	Кислород, платина, алюминий, щелочные металлы и др.	Железо, никель, кобальт, редкоземельные вещества (например, неодим), ряд сплавов



### Контрольные вопросы

1. Почему вещество изменяет магнитное поле?
2. Приведите примеры диамагнетиков; парамагнетиков; ферромагнетиков. Как направлено собственное магнитное поле каждого из этих веществ?
3. Как во внешнем магнитном поле ведет себя тело, изготовленное из диамагнетика? парамагнетика? ферромагнетика?
4. Почему ферромагнитные материалы считают сильномагнитными?
5. Где применяют магнитомягкие материалы? магнито жесткие материалы?
6. Как А. Ампер объяснял намагниченность ферромагнетиков?



### Упражнение № 5

1. Какая сталь — магнитомягкая или магнитожестькая — более пригодна для изготовления постоянных магнитов?
2. Какие магнитные свойства будет иметь: а) железо при  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? б) кобальт при  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
3. Медный цилиндр подвесили на пружине и поместили в сильное магнитное поле (рис. 1). Как при этом изменилось удлинение пружины?
4. Почему на постоянном магните можно удерживать цепочку железных предметов (рис. 2)?
5. В сосуде под большим давлением содержится смесь газов (азота и кислорода). Предложите способ разделения этой смеси на отдельные компоненты.
6. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, узнайте о магнитной левитации. Каковы перспективы ее применения?

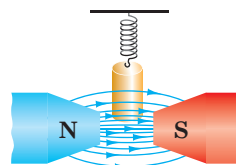


Рис. 1



Рис. 2



### Экспериментальное задание

Исследуйте взаимодействие достаточно сильного магнита с телами, изготовленными из разных материалов (например, из меди, алюминия, железа).



## § 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Электрический школьный звонок, электродвигатель, подъемный кран на складе металлолома, обогатитель железной руды... Как связаны эти, на первый взгляд совсем разные, устройства? Знающий человек ответит, что в каждом используется электромагнит. Выясним, что такое электромагнит и как он работает.

1

### Узнаём, от чего зависит магнитное действие катушки с током

Соберем электрическую цепь из источника тока, катушки, реостата и амперметра. Для оценки магнитного действия катушки с током воспользуемся железным цилиндром, который подвесим на динамометр, размещенный над катушкой (рис. 6.1). Если замкнуть цепь, цилиндр намагнитится в магнитном поле катушки и притянется к ней, дополнительно растянув пружину динамометра.



Рис. 6.1. Исследование магнитного действия катушки с током

Если замкнуть цепь, цилиндр намагнитится в магнитном поле катушки и притянется к ней, дополнительно растянув пружину динамометра.

Понятно, что цилиндр будет притягиваться к катушке тем сильнее, чем сильнее магнитное действие катушки.

Изменяя с помощью реостата силу тока в катушке, выясним, что при увеличении силы тока цилиндр притягивается к катушке сильнее,

о чем свидетельствует большее растяжение пружины динамометра. *При увеличении силы тока в катушке ее магнитное действие усиливается.*

Заменяв катушку на другую, с большим числом витков, увидим, что при той же самой силе тока удлинение пружины динамометра увеличится. *При увеличении числа витков в катушке ее магнитное действие усиливается.*

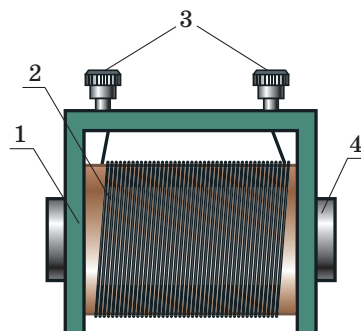
Введем в катушку **сердечник** — толстый стержень из ферромагнитного материала. Включим ток — цилиндр устремится к катушке и «прилипнет» к сердечнику. *Магнитное действие катушки значительно усиливается при введении в нее ферромагнитного сердечника.*

**?** Вспомнив магнитные свойства веществ, объясните, почему для изготовления сердечника используют ферромагнитные материалы. Увеличится ли магнитное действие катушки, если сердечник изготовлен из меди или алюминия?

## 2 Узнаём об устройстве электромагнитов и сфере их применения

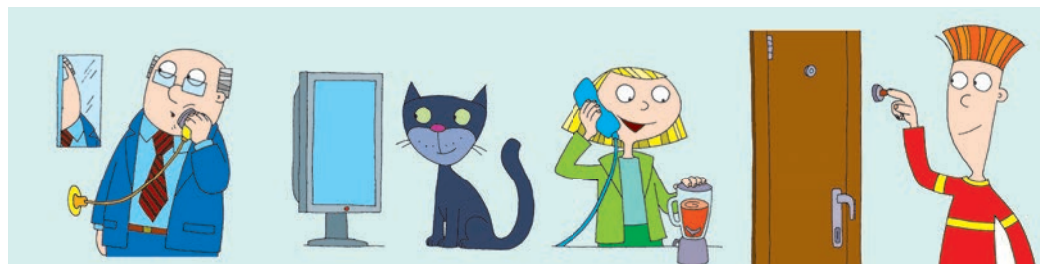
Катушку с сердечником из ферромагнитного материала называют **электромагнитом**.

Рассмотрим устройство электромагнита (рис. 6.2). У любого электромагнита есть **каркас** (1), изготовленный из диэлектрика. На каркас плотно намотан изолированный провод — это **обмотка** электромагнита (2). Концы обмотки подведены к **клеммам** (3), с помощью которых электромагнит присоединяют к источнику тока. Внутри каркаса размещен **сердечник** (4) из магнитомягкой стали. Сердечник часто имеет подковообразную форму, что значительно усиливает магнитное действие электромагнита.



**Рис. 6.2.** Устройство электромагнита: 1 — каркас; 2 — обмотка; 3 — клеммы; 4 — сердечник

Трудно найти область техники, где бы не применялись электромагниты: во-первых, их магнитное действие легко регулировать — достаточно изменить силу тока в обмотке; во-вторых, электромагниты можно изготовить любых форм и размеров. Электромагниты есть во многих бытовых устройствах (рис. 6.3), они входят в состав электродвигателей и электрических генераторов, электроизмерительных приборов и медицинской аппаратуры. Гигантские



**Рис. 6.3.** Во многих бытовых приборах используют электромагниты



**Рис. 6.4.** После замыкания цепи железные опилки притягиваются к сердечнику (а); после размыкания цепи — отпадают от него (б)



**Рис. 6.5.** Электромагнитный подъемный кран

электромагниты используются в ускорителях заряженных частиц (см. «Энциклопедическую страницу» на с. 52–53).

Рассмотрим применение электромагнитов в электромагнитных подъемных кранах и электромагнитном реле.

### 3 Изучаем принцип действия электромагнитного подъемного крана и электромагнитного реле

Соберем электрическую цепь из источника тока и электромагнита. Замкнув цепь, увидим, что железные опилки притянулись к сердечнику электромагнита и их можно перенести, например, на другой конец стола (рис. 6.4).

Именно по такому принципу работают **электромагнитные подъемные краны**, переносящие тяжелые железные болванки, металлолом и т. п. (рис. 6.5). И не нужны никакие крюки! Включили ток — железные предметы притянулись к электромагниту, их перенесли в нужное место, выключили ток — железные предметы перестали притягиваться и остались там, куда их перенесли.

На предприятиях часто используют потребители электроэнергии, сила тока в которых достигает сотен и тысяч ампер. Замыкающее устройство и потребитель соединены последовательно, поэтому через замыкающее устройство должен проходить ток большой силы. А это опасно для людей, работающих за пультом управления.

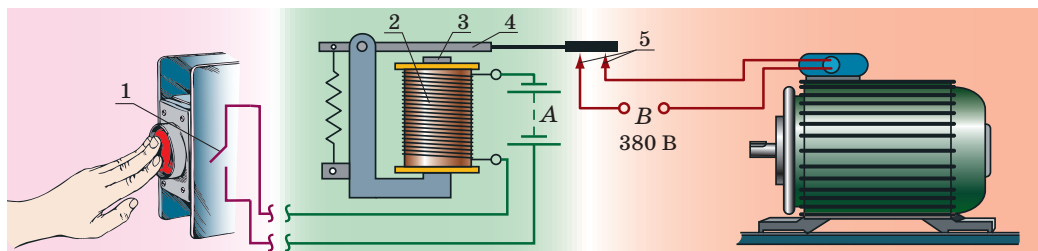
На помощь приходят **электромагнитные реле** — *устройства для управления электрической цепью* (рис. 6.6). *Обратите внимание:* замыкающее устройство (1), установленное на пульте управления, и электромагнит (2) присоединены к источнику тока А с малым напряжением на выходе, а потребитель (на рис. 6.6 это электродвигатель) питается от мощного источника В.



### Подводим итоги

Магнитное действие катушки с током усиливается, если увеличить в ней число витков; увеличить силу тока; ввести в катушку сердечник из ферромагнитного материала.





**Рис. 6.6.** Принцип действия электромагнитного реле. Когда замыкают ключ (1) (нажимают кнопку), в обмотке электромагнита (2) идет слабый безопасный ток, а железный сердечник электромагнита (3) притягивает к себе якорь (4). Когда якорь опускается и замыкает контакты (5), замыкается цепь электродвигателя, потребляющего ток значительно большей силы

Катушку с введенным внутрь сердечником, изготовленным из магнитомягкой стали, называют электромагнитом. Электромагниты широко используют в технике: их можно изготовить любых форм и размеров, их магнитное действие легко регулировать, изменяя силу тока в обмотке.



### Контрольные вопросы

1. От чего и как зависит магнитное действие катушки с током? Опишите опыт, подтверждающий ваш ответ.
2. Что такое электромагнит? Каково его устройство?
3. Почему электромагниты широко применяют в технике?
4. Объясните принцип действия электромагнитного подъемного крана.
5. Для чего предназначено электромагнитное реле? Опишите принцип его действия.



### Упражнение № 6

1. Для изготовления сердечника электромагнита вместо магнитомягкой стали использовали магнитожестький материал. Какие недостатки будет иметь такой электромагнит?
2. Намотав на железный гвоздь изолированный провод и соединив концы провода с батареей гальванических элементов, получили простейший электромагнит (рис. 1). Определите полюсы этого электромагнита.
3. К какой паре зажимов электромагнитного реле (рис. 2) следует присоединить источник слабого (управляющего) тока?
4. Как изменится подъемная сила электромагнита, если передвинуть ползунок реостата вправо (рис. 3)? Ответ обоснуйте.
5. На рис. 4 представлена схема устройства, автоматически срабатывающего при определенной температуре. Назовите основные части этого устройства, объясните принцип его действия. Где целесообразно устанавливать такие автоматические устройства?

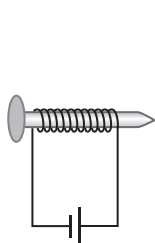


Рис. 1

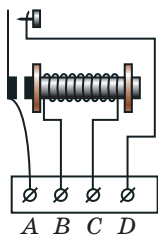


Рис. 2

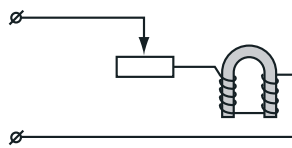


Рис. 3

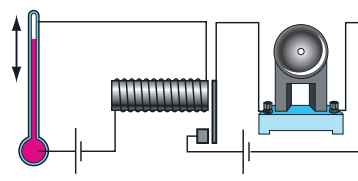


Рис. 4

6. Воспользовавшись рис. 5, попробуйте разобраться, как работает электрический звонок. Если не получится, обратитесь к дополнительным источникам информации.
7. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о технологии магнитной сепарации. Где ее используют?
8. Дайте характеристику силы как физической величины: что она характеризует, каким символом ее обозначают, скалярная это величина или векторная, каковы ее единицы в СИ.



### Экспериментальное задание

Изготовьте электромагнит: намотайте на железный гвоздь изолированный провод и соедините концы провода с батареей гальванических элементов (см. рис. 1). Разомкнув цепь, закрепите электромагнит горизонтально на некотором расстоянии от поверхности стола. Смешайте маленькие обрывки бумаги, зерна риса и мелкие железные предметы (лучше опилки). Замкните цепь. Медленно просыпая смесь рядом со шляпкой гвоздя, отделите железные предметы. Подумайте, как усовершенствовать данное устройство.

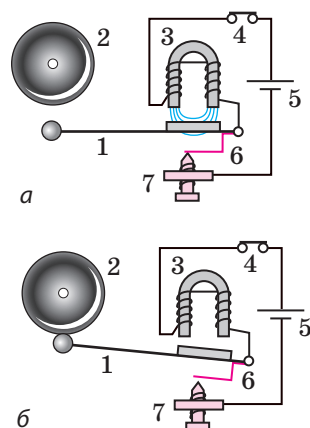


Рис. 5. Схема действия электрического звонка: 1 — молоточек; 2 — чаша звонка; 3 — подковообразный электромагнит; 4 — кнопка; 5 — источник тока; 6 — контактная пружина, касающаяся винта 7



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1



**Тема.** Изготовление и испытание электромагнита.

**Цель:** научиться изготавливать простейший электромагнит; выяснить, от чего зависит его магнитное действие.

**Оборудование:** амперметр, динамометр со штативом или пробник, магнитная стрелка или компас, изолированный медный провод, источник постоянного тока, два железных стержня (или два больших гвоздя), железные опилки, реостат, ключ, соединительные провода.

### Теоретические сведения

Для оценки магнитного действия электромагнита можно воспользоваться *пробником* (рис. 1). Он представляет собой стальную пластинку (1) со шкалой (2); пластинка закреплена с помощью пружины (3) внутри пластикового корпуса (4). Если пластинку пробника поднести к электромагниту, магнитное поле электромагнита будет действовать на пластинку. Пластинка притягивается к электромагниту тем сильнее, чем сильнее его магнитное действие. Силу притяжения электромагнита оценивают по шкале. Данную силу можно также измерить с помощью *динамометра* (см. рис. 6.1).



## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

### II

#### Подготовка к эксперименту

1. Перед выполнением работы вспомните: 1) требования безопасности при работе с электрическими цепями; 2) правила, которые необходимо соблюдать при измерении силы тока амперметром; 3) как зависит магнитное действие электромагнита от силы тока, количества витков в обмотке и наличия железного сердечника.
2. Определите цены деления шкал амперметра и динамометра.

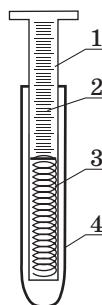


Рис. 1

### ▶

#### Эксперимент

*Строго придерживайтесь инструкции по безопасности (см. форзац).*

1. Изготовьте два электромагнита с разным количеством витков в обмотке. Для этого возьмите два одинаковых железных стержня и намотайте на них разное количество витков изолированного медного провода: на один стержень — 20 витков, на другой — 40.
2. Взяв электромагнит с бóльшим числом витков, соберите электрическую цепь (рис. 2).
3. Замкните цепь и убедитесь, что электромагнит притягивает железные опилки, то есть проявляет магнитные свойства.
4. С помощью магнитной стрелки или компаса определите полюсы полученного электромагнита. Опишите, как вы это сделали.
5. Выясните, от чего зависит магнитное действие электромагнита.
  - 1) Используя реостат, в обмотке электромагнита с бóльшим числом витков установите силу тока сначала 0,5 А, а затем 1,5 А. Сравните магнитное действие электромагнита при разной силе тока в обмотке.
  - 2) Извлеките стержень из обмотки и установите в обмотке силу тока 1,5 А. Определите, как влияет наличие сердечника на магнитное действие электромагнита.
  - 3) Соберите электрическую цепь (см. рис. 2) с электромагнитом, имеющим меньшее количество витков в обмотке. С помощью реостата установите в цепи ток силой 1,5 А. Определите, как уменьшение числа витков влияет на магнитное действие электромагнита.

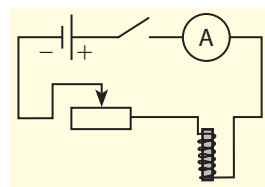


Рис. 2

### □

#### Анализ результатов эксперимента

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сделайте вывод, в котором укажите, как зависит магнитное действие электромагнита от силы тока, количества витков в обмотке, наличия железного сердечника.

### +

#### Творческое задание

Как нужно намотать обмотку электромагнита, чтобы при подключении к нему источника тока на обоих концах электромагнита образовался южный полюс? Проверьте свое предположение экспериментально.

## § 7. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ

Физические исследования, которые часто проводят ради «научного любопытства», при удачном завершении могут открыть новый этап в развитии техники. Именно так произошло с изучением электромагнитных явлений. Один государственный деятель спросил у *Майкла Фарадея*: «Как вы думаете, будет ли какая-то польза от электричества?» Фарадей улыбнулся: «Скоро вы будете облагать электричество налогом!» Прошло время, и сейчас нашу жизнь невозможно представить, например, без электрических двигателей — удобных, компактных, экологически чистых устройств. О том, как работают некоторые электрические устройства, вы узнаете из этого параграфа.

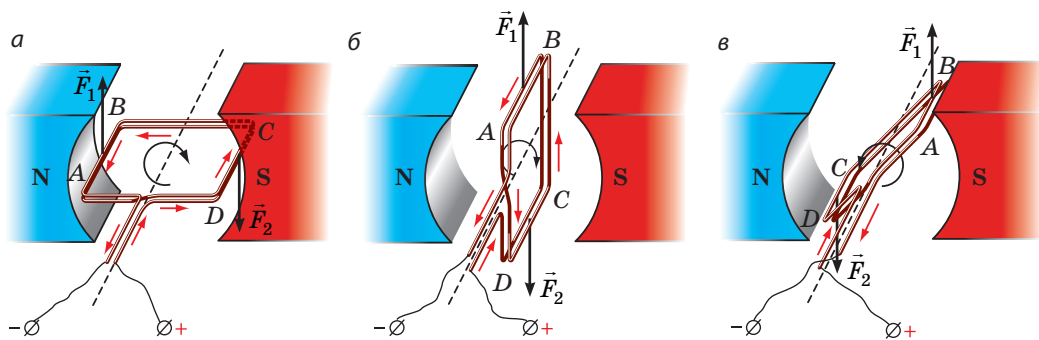
### 1 Изучаем действие магнитного поля на рамку с током

Возьмем легкую прямоугольную рамку, состоящую из нескольких витков изолированного провода, и поместим ее между полюсами магнита так, чтобы она могла легко вращаться вокруг горизонтальной оси.

Пропустим в рамке электрический ток (рис. 7.1, а). Рамка повернется и, качнувшись несколько раз, установится так, как показано на рис. 7.1, б. Это — положение равновесия рамки.

Выясним, *почему рамка начинает движение*. Воспользовавшись правилом левой руки, определим направление силы Ампера, действующей на каждую сторону рамки в начале наблюдения. На рис. 7.1, а видим, что сила Ампера  $\vec{F}_1$ , действующая на сторону  $AB$ , направлена вверх, а сила Ампера  $\vec{F}_2$ , действующая на сторону  $CD$ , направлена вниз. Итак, обе силы поворачивают рамку по ходу часовой стрелки.

А теперь выясним, *почему рамка прекратила движение*. Дело в том, что после прохождения рамкой положения равновесия силы Ампера будут поворачивать ее уже против хода часовой стрелки (рис. 7.1, в). В результате рамка начнет поворачиваться в обратном направлении, пройдет положение равновесия и снова изменит направление движения. В конце концов из-за действия сил трения рамка остановится.



**Рис. 7.1.** Исследование действия магнитного поля на рамку с током (направление тока показано красными стрелками):

- а — силы Ампера ( $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ ) поворачивают рамку  $ABCD$  по ходу часовой стрелки;
- б — в положении равновесия силы Ампера не поворачивают рамку, а растягивают;
- в — силы Ампера поворачивают рамку против хода часовой стрелки

**?** Воспользовавшись правилом левой руки, убедитесь в том, что для каждого из положений рамки на рис. 7.1 сила  $\vec{F}_1$ , действующая на сторону  $AB$  рамки, направлена вверх, а сила  $\vec{F}_2$ , действующая на сторону  $CD$  рамки, — вниз.

## 2 Выясняем, как работает двигатель постоянного тока

Вращение рамки с током в магнитном поле было использовано при создании *электрических двигателей*.

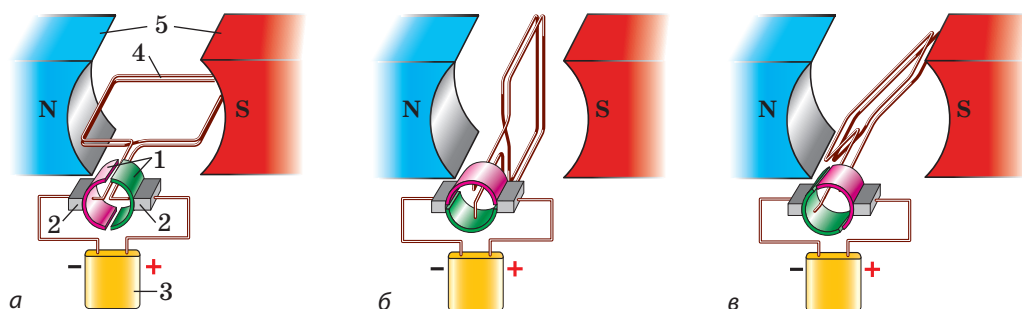
**Электрический двигатель** — это устройство, в котором электрическая энергия преобразуется в механическую.

Чтобы понять, как работает электродвигатель постоянного тока, выясним, как заставить рамку непрерывно вращаться в одном направлении. Нетрудно догадаться: нужно, чтобы *в момент прохождения рамкой положения равновесия направление тока в рамке изменялось на противоположное*.

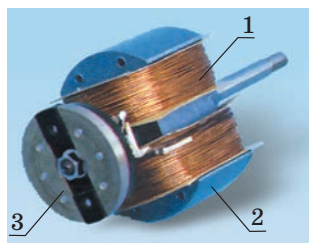
Устройство, автоматически изменяющее направление тока в рамке, называют **коллектором**.

На рис. 7.2 изображена модель, с помощью которой можно понять принцип действия коллектора. Коллектор представляет собой два полукольца (1), к каждому из которых прижата металлическая щетка (2). Полукольца изготовлены из проводника и разделены зазором. Щетки служат для подведения напряжения от источника тока (3) к рамке (4), которая легко вращается вокруг горизонтальной оси и расположена между полюсами мощного магнита (5). Одна щетка соединена с положительным полюсом источника тока, другая — с отрицательным.

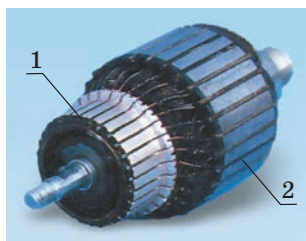
После замыкания цепи рамка в результате действия сил Ампера начинает поворачиваться по ходу часовой стрелки (рис. 7.2, а). Полукольца коллектора поворачиваются вместе с рамкой, а щетки остаются неподвижными, поэтому после прохождения рамкой положения равновесия (рис. 7.2, б) к щеткам будут прижаты уже другие полукольца (рис. 7.2, в). Направление тока в рамке изменится на противоположное, поэтому она продолжит движение по ходу часовой стрелки, то есть направление вращения рамки не изменится.



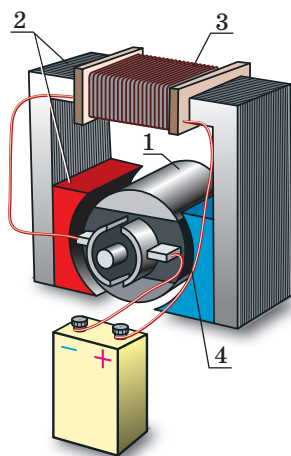
**Рис. 7.2.** Модель, демонстрирующая принцип действия коллектора (а). После прохождения рамкой положения равновесия (б) щетки коллектора прижаты уже к другим полукольцам (в), поэтому направление тока в рамке изменяется на противоположное



**Рис. 7.3.** Ротор двигателя с одной обмоткой:  
1 — обмотка; 2 — сердечник; 3 — полукольца



**Рис. 7.4.** Ротор двигателя с двенадцатью обмотками:  
1 — пластины коллектора; 2 — сердечник с обмоткой



**Рис. 7.5.** Модель электродвигателя постоянного тока:  
1 — ротор; 2 — статор;  
3 — обмотка статора;  
4 — коллектор

**?** Для положений *a* и *в* (см. [рис. 7.2](#)) определите направления сил Ампера, действующих на стороны рамки. Докажите, что силы Ампера вращают рамку по ходу часовой стрелки.

Таким образом, чтобы изготовить электрический двигатель, нужно иметь: 1) постоянный магнит или электромагнит; 2) проводящую рамку; 3) источник тока; 4) коллектор.

### **3 Увеличиваем мощность электрического двигателя**

Силы Ампера, обеспечивающие вращение рамки, прямо пропорциональны длине проводника. Поэтому для увеличения мощности электродвигателя его обмотку изготавливают из большого количества витков провода. Витки вкладывают в специальные пазы на боковой поверхности сердечника — цилиндра, изготовленного из листов магнитомягкой стали. Сердечник с обмоткой вместе с полукольцами коллектора образуют **ротор** (от лат. *rotare* — вращаться) двигателя ([рис. 7.3](#)).

Для равномерного вращения ротора используют несколько обмоток, которые наматывают на один сердечник. Коллектор такого двигателя имеет не два полукольца, а ряд медных дугообразных пластин, закрепленных на изолированном барабане ([рис. 7.4](#)).

В большинстве современных электродвигателей вместо постоянного магнита используют электромагнит, который составляет единое целое с корпусом электродвигателя и служит **статором** (неподвижной частью устройства; от лат. *stator* — стоящий неподвижно). Обмотки статора и ротора подключены к одному источнику тока. Когда в обмотках идет ток, ротор вращается в магнитном поле статора и двигатель работает ([рис. 7.5](#)).

Электродвигатели постоянного тока широко применяют в электротранспорте (трамваях, троллейбусах, электровозах, электромобилях), их используют как стартеры для запуска двигателей внутреннего сгорания. В промышленности и быту чаще используют электродвигатели переменного тока.

Электрические двигатели имеют существенные преимущества перед тепловыми: они более компактны, экономичны (их КПД достигает 98 %), удобны в применении (их мощность легко регулировать), не загрязняют окружающую среду.

#### 4 Знакомимся с принципом действия электроизмерительных приборов

На поворачивании рамки с током в магнитном поле постоянного магнита основано действие электроизмерительных приборов *магнито-электрической системы* — гальванометров, амперметров и вольтметров постоянного тока.

Схема измерительного механизма таких приборов представлена на рис. 7.6.

Когда ток в рамке (4) отсутствует, спиральные пружины (2) удерживают полуоси (3), а значит, и стрелку (6) так, что конец стрелки устанавливается на нулевой отметке шкалы прибора (7). Когда прибор включают в цепь, в рамке идет ток и в результате действия сил Ампера рамка поворачивается в магнитном поле постоянного магнита (1). Вместе с рамкой поворачиваются полуоси, а значит, и стрелка.

Во время движения рамки пружины закручиваются и возникают дополнительные силы упругости. Когда момент сил упругости уравнивает момент сил Ампера, движение рамки прекращается, а стрелка остается отклоненной. Чем больше сила тока в рамке, тем на больший угол отклонится стрелка и тем большим будет показание прибора.

Приборы магнитоэлектрической системы имеют большую точность и чувствительность.

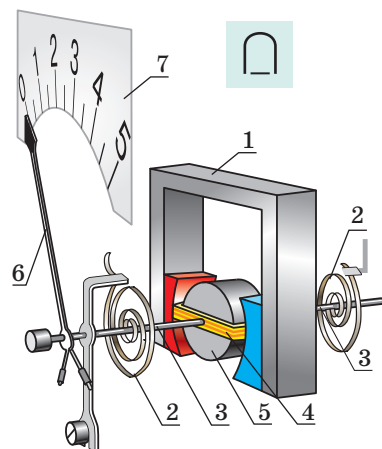
#### 5 Сравниваем амперметр и вольтметр

Амперметр и вольтметр имеют одинаковое устройство, отличаются только их шкалы и электрические сопротивления. *Амперметр* включают в цепь *последовательно*, поэтому его сопротивление должно быть как можно меньшим, иначе сила тока в цепи значительно уменьшится. А вот *вольтметр* присоединяют к цепи *параллельно* с устройством, на котором измеряют напряжение, поэтому, чтобы сила тока в цепи практически не изменялась, сопротивление вольтметра должно быть как можно большим.

#### 6 Знакомимся с принципом действия электродинамического громкоговорителя

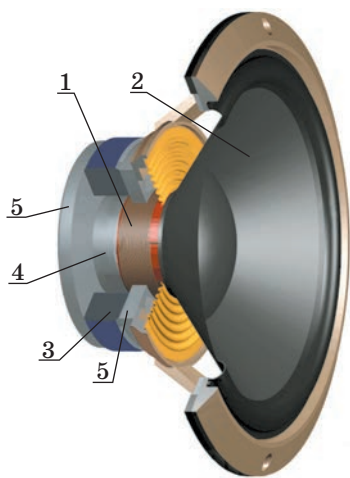
**Электродинамический громкоговоритель (динамик)** — это устройство, преобразующее электрический сигнал в слышимый звук.

Звук излучают тела, колеблющиеся с частотой 20–20 000 Гц (то есть совершающие от 20 до 20 000 колебаний в секунду)\*. Основные части



**Рис. 7.6.** Схема измерительного механизма приборов магнитоэлектрической системы: 1 — постоянный неподвижный магнит; 2 — спиральные пружины; 3 — полуоси; 4 — рамка, жестко закрепленная на полуосях; 5 — неподвижный сердечник; 6 — стрелка; 7 — шкала

\* Подробнее о звуке вы узнаете из раздела III учебника.



**Рис. 7.7.** Устройство электродинамического громкоговорителя: 1 — звуковая катушка; 2 — диффузор; 3 — постоянный кольцевой магнит; 4 — kern; 5 — фланцы

динамика — катушка с током (звуковая катушка) (1), к которой прикреплен диффузор (2), и магнитная система, состоящая из постоянного кольцевого магнита (3), стального цилиндра (керна) (4) и двух стальных дисков (фланцев) (5), плотно прилегающих к магниту. Магнитная система создает магнитное поле, направленное перпендикулярно виткам катушки.

Когда в катушке течет ток, на ее витки действуют силы Ампера, заставляющие катушку двигаться вдоль керна и втягиваться в зазор кольцевого магнита. Когда сила тока в катушке изменяется со звуковой частотой, так же изменяются и силы Ампера, и катушка то сильнее, то слабее втягивается в зазор (колеблется в такт изменению силы тока). Вместе с катушкой колеблется и прикрепленный к ней диффузор, который «толкает» воздух, создавая звуковую волну, — громкоговоритель излучает звук.



### Подводим итоги

В результате действия сил Ампера рамка с током может поворачиваться в магнитном поле. Это явление используют в работе электродвигателей. Чтобы обеспечить вращение рамки, применяют коллектор — устройство, автоматически изменяющее направление тока в рамке.

Гальванометры, амперметры и вольтметры — это измерительные приборы магнитоэлектрической системы. Их действие основано на поворачивании рамки с током в магнитном поле постоянного магнита.

Еще один пример применения сил Ампера — электродинамический громкоговоритель, действие которого основано на втягивании катушки с током в магнитное поле кольцевого магнита.

### Контрольные вопросы



1. Почему рамка с током поворачивается в магнитном поле? почему останавливается?
2. Назовите основные части электродвигателя. Какая из них «отвечает» за непрерывное вращение ротора электродвигателя?
3. Что представляет собой статор электродвигателя?
4. Перечислите преимущества электрических двигателей в сравнении с тепловыми.
5. Опишите строение и принцип действия измерительных приборов магнитоэлектрической системы.
6. Отличаются ли устройство и принцип действия амперметров и вольтметров? Если да, то чем?
7. Опишите устройство и принцип действия громкоговорителя.



### Упражнение № 7

1. На рис. 1 изображена рамка с током, которая поворачивается в магнитном поле постоянного магнита. Определите направление тока в рамке.

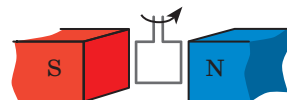


Рис. 1



2. В случае последовательного включения вольтметра в электрическую цепь сила тока в этой цепи значительно уменьшается. Почему?
3. На зажимах измерительных приборов магнитоэлектрической системы указана полярность («+» и «-»). Что произойдет, если не соблюсти полярность при включении прибора?
4. Электрические двигатели имеют ряд преимуществ по сравнению с тепловыми. Почему же люди не отказываются от применения тепловых двигателей?
5. Кроме электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы существуют измерительные приборы электродинамической и электромагнитной систем. В измерительных приборах электродинамической системы (рис. 2) вместо постоянного магнита используется электромагнит. Действие измерительных приборов электромагнитной системы (рис. 3) основано на втягивании ферромагнитного диска в зазор неподвижной катушки с током. Рассмотрите рис. 2 и 3 и попробуйте объяснить, как работают данные приборы. При необходимости обратитесь к дополнительным источникам информации.
6. Вспомните, что такое электрический ток. Дайте его определение. При каких условиях возникает ток?

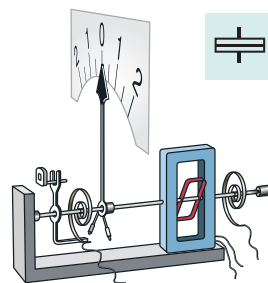


Рис. 2

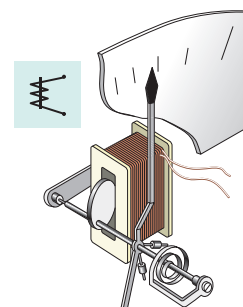


Рис. 3

### Экспериментальное задание

«Мастер-ломастер». Рассмотрите устройство электрического двигателя из игрушки. Присоедините двигатель к батарее гальванических элементов и обратите внимание на направление вращения ротора. Как можно изменить направление вращения ротора на противоположное? Проверьте свое предположение.

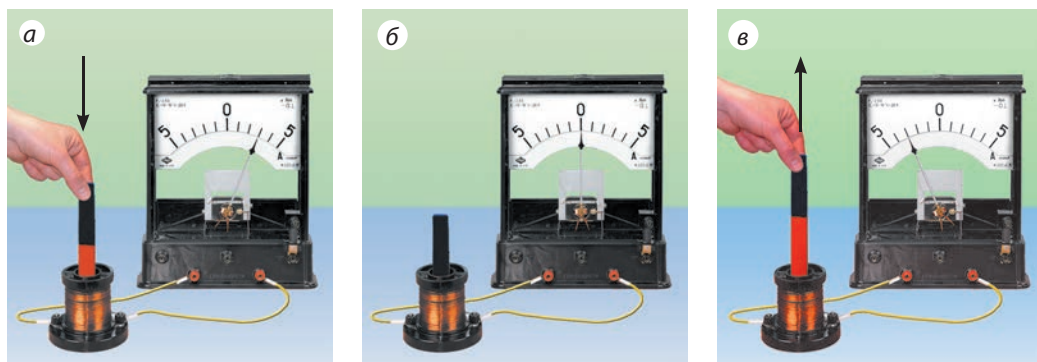
## § 8. ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ИНДУКЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Опыты Х. Эрстеда и А. Ампера (см. § 1) показали, что электрический ток создает магнитное поле. А можно ли сделать наоборот, то есть с помощью магнитного поля получить электрический ток? После более чем 16 тысяч опытов английский физик и химик Майкл Фарадей 29 августа 1831 г. получил электрический ток с помощью магнитного поля постоянного магнита. Какие же опыты проводил Фарадей и какое значение имело его открытие?

1

### Воспроизводим опыты Фарадея

Замкнем катушку на гальванометр и будем вводить в катушку постоянный магнит. Во время движения магнита стрелка гальванометра отклонится, а это означает, что в катушке возник электрический ток (рис. 8.1, а).



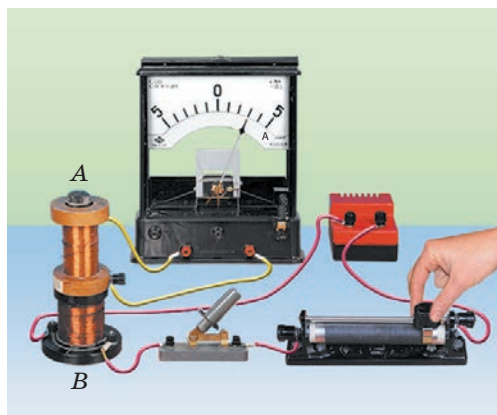
**Рис. 8.1.** Возникновение тока в катушке фиксируется гальванометром: *а* — если магнит вводить в катушку, стрелка гальванометра отклоняется вправо; *б* — если магнит неподвижен, ток не возникает и стрелка не отклоняется; *в* — если выводить магнит из катушки, стрелка гальванометра отклоняется влево

Чем быстрее двигать магнит, тем больше будет сила тока; если движение магнита прекратить, прекратится и ток — стрелка вернется на нулевую отметку (рис. 8.1, *б*). Вынимая магнит из катушки, видим, что стрелка гальванометра отклоняется в другую сторону (рис. 8.1, *в*), а после прекращения движения магнита снова возвращается на нулевую отметку.

Если оставить магнит неподвижным, а двигать катушку (или приближать ее к магниту, или удалять от него, или поворачивать вблизи полюса магнита), то снова будем наблюдать отклонение стрелки гальванометра.

Теперь возьмем две катушки — *А* и *В* — и наденем их на один сердечник (рис. 8.2). Катушку *В* через реостат присоединим к источнику тока, а катушку *А* замкнем на гальванометр. Если передвигать ползунок реостата, то в катушке *А* будет идти электрический ток. Ток будет возникать как при увеличении, так и при уменьшении силы тока в катушке *В*. А вот направление

тока будет разным: при увеличении силы тока стрелка гальванометра будет отклоняться в одну сторону, а при уменьшении — в другую. Ток в катушке *А* будет возникать также в момент замыкания и в момент размыкания цепи катушки *В*.



**Рис. 8.2.** Если разомкнуть или замкнуть цепь катушки *В* или изменить в ней силу тока, в катушке *А* возникнет ток

**?** Возникнет ли ток в катушке *А* (см. рис. 8.2), если ее двигать относительно катушки *В*?

Все рассмотренные опыты — это современный вариант тех, которые на протяжении 10 лет проводил Майкл Фарадей и благодаря которым он пришел к выводу: *в замкнутом проводящем контуре возникает*

электрический ток, если количество линий магнитной индукции, пронизывающих ограниченную контуром поверхность, изменяется.

Данное явление было названо **электромагнитной индукцией**, а электрический ток, возникающий при этом, — **индукционным** (наведенным) **током** (рис. 8.3).

**?** Возникнет ли в замкнутой рамке индукционный ток, если рамку поступательно (не поворачивая) передвигать между полюсами электромагнита (рис. 8.4)?

## 2 Выясняем причины возникновения индукционного тока

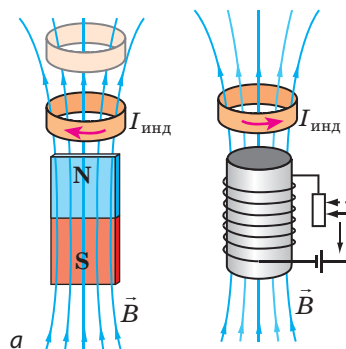
Вы узнали, когда в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток. А что является причиной его возникновения? Рассмотрим два случая.

1. *Проводящий контур движется в магнитном поле (рис. 8.3, а).* В данном случае свободные заряженные частицы внутри проводника движутся вместе с ним в определенном направлении. Магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы с определенной силой, и под действием этой силы частицы начинают направленное движение вдоль проводника, — в проводнике возникает индукционный электрический ток.

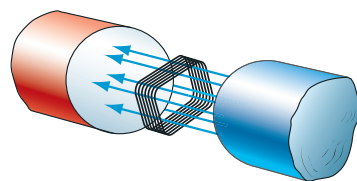
2. *Неподвижный проводящий контур расположен в переменном магнитном поле (рис. 8.3, б).* В этом случае силы, действующие со стороны магнитного поля, не могут сделать направленным хаотичное движение заряженных частиц внутри проводника. Почему же в контуре возникает индукционный ток? Дело в том, что **переменное магнитное поле всегда сопровождается возникновением в окружающем пространстве вихревого электрического поля** (силовые линии такого поля являются замкнутыми). Таким образом, не магнитное, а **электрическое поле, действуя на свободные заряженные частицы в проводнике, придает им направленное движение, тем самым создавая индукционный ток.**

## 3 Определяем направление индукционного тока

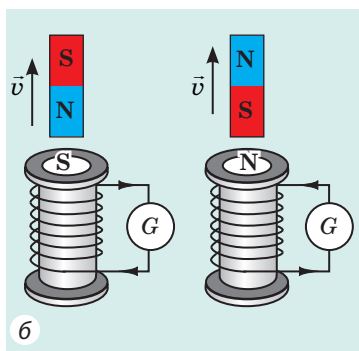
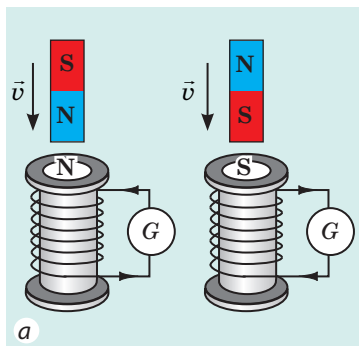
Чтобы определить направление индукционного тока, воспользуемся замкнутой катушкой. Если изменять пронизывающую катушку магнитное поле (например, приближать или удалять магнит), то в катушке возникает индукционный ток и она сама становится магнитом. опыты показывают: 1) если магнит приближать к катушке, то катушка будет отталкиваться от магнита; 2) если магнит удалять от катушки, то катушка будет притягиваться к магниту.



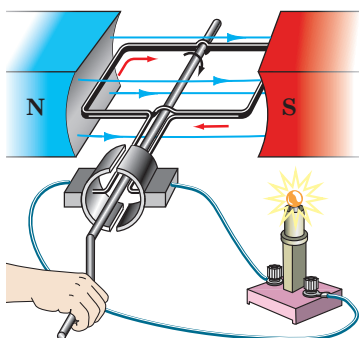
**Рис. 8.3.** Возникновение индукционного тока при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих контур: а — контур приближают к магниту; б — ослабляют магнитное поле, в котором расположен контур



**Рис. 8.4.** К заданию в § 8



**Рис. 8.5.** Направление индукционного тока в замкнутой катушке: *a* — магнит приближают к катушке; *б* — магнит удаляют от катушки



**Рис. 8.6.** Если вращать рамку в магнитном поле, в рамке возникает индукционный ток

Это означает:

1) если количество линий магнитной индукции, пронизывающих катушку, увеличивается (магнитное поле внутри катушки усиливается), то в катушке возникает индукционный ток такого направления, что катушка будет обращена к магниту одноименным полюсом (рис. 8.5, *a*).

2) если количество линий магнитной индукции, пронизывающих катушку, уменьшается, то в катушке возникает индукционный ток такого направления, что катушка будет обращена к магниту разноименным полюсом (рис. 8.5, *б*).

Зная полюсы катушки и воспользовавшись правой рукой (см. § 3), можно определить направление индукционного тока. Аналогично поступают и в случае, когда две катушки надеты на общий сердечник (см. пункт 5 § 8).

#### 4

### Знакомимся с промышленными источниками электрической энергии

Явление электромагнитной индукции используют в электромеханических генераторах, без которых невозможно представить современную электроэнергетику.

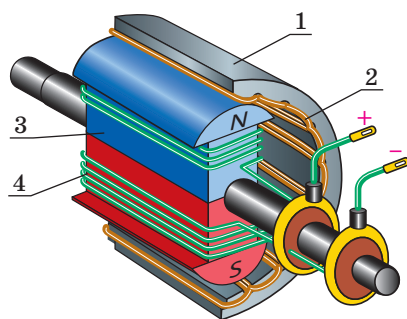
**Электромеханический генератор** — устройство, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую.

Выясним принцип действия электромеханического генератора. Возьмем рамку, состоящую из нескольких витков провода, и будем вращать ее в магнитном поле (рис. 8.6). При вращении рамки число пронизывающих ее магнитных линий то увеличивается, то уменьшается. В результате в рамке возникает ток, наличие которого доказывает свечение лампы.

Промышленные генераторы электрического тока устроены практически так же, как электродвигатели, однако по принципу действия генератор — это электрический двигатель «наоборот». Как и электродвигатель, генератор состоит из статора и ротора (рис. 8.7). Массивный неподвижный *статор* (1) представляет собой полый цилиндр, на внутренней поверхности которого размещен толстый

медный изолированный провод — *обмотка статора* (2). Внутри статора вращается *ротор* (3). Он, как и ротор электродвигателя, представляет собой большой цилиндр, в пазы которого вложена *обмотка ротора* (4). Эта обмотка питается от источника постоянного тока. Ток течет по обмотке ротора, создавая магнитное поле, которое пронизывает обмотку статора.

Под действием пара (на тепловых и атомных электростанциях) или падающей с высоты воды (на гидроэлектростанциях) ротор генератора начинает быстро вращаться. Вследствие этого число линий магнитной индукции, пронизывающих витки обмотки статора, изменяется и в обмотке возникает индукционный ток. После ряда преобразований этот ток подают потребителям электрической энергии.



**Рис. 8.7.** Схема устройства электрохимического генератора:  
1 — статор; 2 — обмотка статора;  
3 — ротор; 4 — обмотка ротора

5

### Учимся решать задачи

**Задача.** Катушка и алюминиевое кольцо надеты на общий сердечник (рис. 1). Определите направление индукционного тока в кольце при замыкании ключа. Как будет вести себя кольцо в момент замыкания ключа? через некоторое время после замыкания ключа? в момент размыкания ключа?

*Анализ физической проблемы, решение*

1) Ток в катушке направлен по ее передней стенке вверх (от «+» к «-»). Воспользовавшись правой рукой, определим полюсы катушки (направление магнитных линий внутри катушки): ближе к кольцу будет южный полюс катушки (рис. 2).

2) В момент замыкания ключа сила тока в катушке увеличивается, поэтому магнитное поле внутри кольца усиливается.

3) В кольце возникает индукционный ток такого направления, что кольцо будет обращено к катушке одноименным полюсом (южным) и оттолкнется от нее.

4) Воспользовавшись правой рукой, определим направление индукционного тока в кольце (оно будет противоположно направлению тока в катушке).

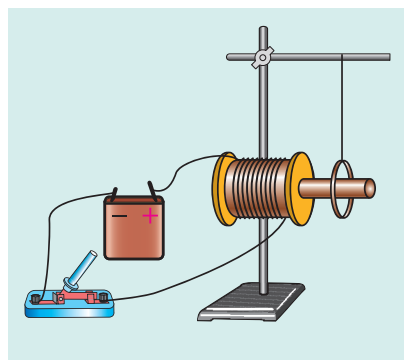


Рис. 1

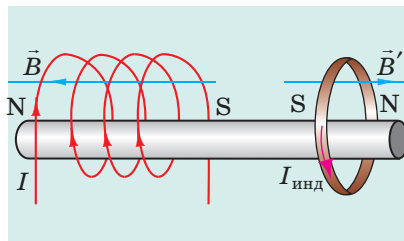


Рис. 2



### Как определить направление индукционного тока (алгоритм)

1. Определяем направление магнитной индукции внешнего магнитного поля ( $\vec{B}$ ).
2. Выясняем, усиливается или ослабляется внешнее магнитное поле (увеличивается или уменьшается число линий магнитной индукции, пронизывающих контур).
3. Определяем направление магнитного поля, созданного индукционным током ( $\vec{B}'$ ).
4. Определяем направление индукционного тока.

Почти сразу после замыкания ключа ток в катушке будет постоянным, магнитное поле внутри кольца не будет изменяться и индукционного тока в кольце не будет. Кольцо изготовлено из магнитослабого материала, поэтому оно почти не будет взаимодействовать с катушкой.

В момент размыкания ключа сила тока в катушке быстро уменьшается, созданное катушкой магнитное поле ослабляется. В кольце возникает индукционный ток такого направления, что кольцо будет обращено к катушке разноименным полюсом и на короткое время притянется к ней (рис. 3).

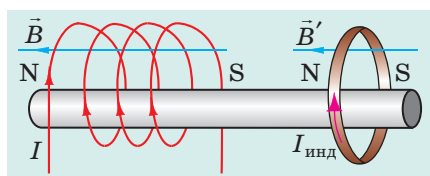


Рис. 3



### Подводим итоги

В замкнутом проводящем контуре при изменении количества линий магнитной индукции, пронизывающих контур, возникает электрический ток. Такой ток называют индукционным, а явление возникновения тока — электромагнитной индукцией.

Одна из причин возникновения индукционного тока заключается в том, что переменное магнитное поле всегда сопровождается возникновением в окружающем пространстве электрического поля. Электрическое поле действует на свободные заряженные частицы в проводнике, и те начинают двигаться направленно — возникает индукционный ток.



### Контрольные вопросы

1. Опишите опыты М. Фарадея.
2. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
3. Какой ток называют индукционным?
4. Каковы причины возникновения индукционного тока?
5. Работа каких устройств основана на явлении электромагнитной индукции? Какие преобразования энергии в них происходят?
6. Опишите устройство и принцип действия генераторов электрического тока.



### Упражнение № 8

1. Две неподвижные катушки расположены так, как показано на рис. 1. Миллиамперметр, подключенный к одной из катушек, регистрирует наличие тока. При каком условии это возможно?
2. На рис. 2 изображено устройство, которое называют «кольца Ленца». Устройство состоит из двух алюминиевых колец (сплошного и разрезанного),



закрепленных на алюминиевом коромысле, которое может легко вращаться вокруг вертикальной оси.

- 1) Как будет вести себя сплошное кольцо устройства, если: а) приближать к нему магнит? б) удалять от него магнит? в) приближать к нему магнит южным полюсом?
- 2) Для каждого случая а–в в пункте 1 определите направление индукционного тока в сплошном кольце и направление индукции магнитного поля, созданного этим током.
- 3) Что будет происходить, если магнит приближать к разрезанному алюминиевому кольцу?
3. Две катушки надеты на один сердечник (рис. 3). Определите направление индукционного тока в катушке А, если: 1) замкнуть цепь; 2) разомкнуть цепь; 3) передвинуть ползунок реостата влево; 4) передвинуть ползунок реостата вправо.

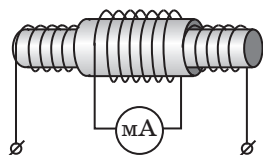


Рис. 1

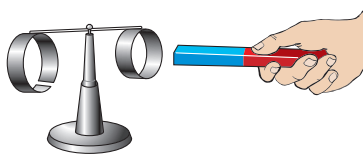


Рис. 2

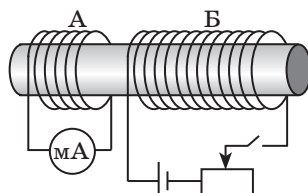


Рис. 3

4. Составьте задачу, обратную задаче, рассмотренной в пункте 5 § 8. Решите составленную задачу.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

**Тема.** Наблюдение явления электромагнитной индукции.

**Цель:** исследовать условия возникновения индукционного тока в замкнутой катушке; выявить факторы, от которых зависят сила и направление индукционного тока.

**Оборудование:** миллиамперметр, два полосовых или два подковообразных магнита, проволоочная катушка-моток на каркасе, маркер.



### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



#### Подготовка к эксперименту

1. Перед выполнением работы вспомните:
  - 1) требования безопасности при работе с электрическими цепями;
  - 2) правила, которые необходимо соблюдать при измерении силы тока амперметром;
  - 3) как зависит сила индукционного тока от скорости изменения магнитного поля;
  - 4) от чего зависит направление индукционного тока.

2. Выполните задание. На рис. 1–4 изображены полосовой магнит, катушка-моток, присоединенная к миллиамперметру, и указано направление скорости движения магнита. Перенесите рисунки в тетрадь и для каждого случая: 1) укажите магнитные полюсы катушки; 2) определите и покажите направление индукционного тока в катушке.

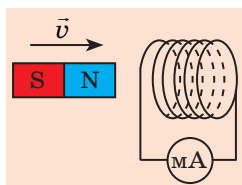


Рис. 1

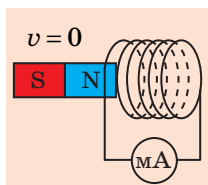


Рис. 2

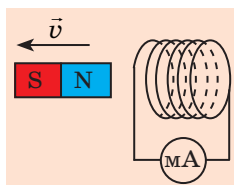


Рис. 3

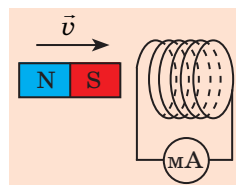


Рис. 4

3. Соберите электрическую цепь, присоединив провода катушки к клеммам миллиамперметра.
4. На одном из торцов катушки поставьте маркером метку.

*Строго придерживайтесь инструкции по безопасности (см. форзац).*



### Эксперимент 1

*Выяснение условий возникновения индукционного тока в замкнутом проводнике и факторов, от которых зависит направление индукционного тока.*

Удерживая катушку и магнит в руках, последовательно выполните опыты, перечисленные в табл. 1. Заполните табл. 1.

*Обратите внимание!* Магнит нужно вводить в катушку и выводить из нее только со стороны того торца катушки, на котором поставлена метка.

Таблица 1

Номер опыта	Действия с магнитом и катушкой	Как ведет себя стрелка миллиамперметра (отклоняется влево, вправо, не отклоняется)
1	Вводим магнит в катушку северным полюсом	
2	Оставляем магнит неподвижным	
3	Выводим магнит из катушки	
4	Вводим магнит в катушку южным полюсом	
5	Оставляем магнит неподвижным	
6	Выводим магнит из катушки	
7	Приближаем катушку к южному полюсу магнита	
8	Приближаем катушку к северному полюсу магнита	

### ■ Анализ результатов эксперимента 1

Проанализируйте табл. 1 и сформулируйте вывод, в котором укажите: 1) при каких условиях в замкнутой катушке возникает индукционный ток;

2) как изменяется направление индукционного тока при изменении направления движения магнита;

3) как изменяется направление индукционного тока при изменении полюса магнита, который приближают или удаляют от катушки.

### ▶ Эксперимент 2

*Выяснение факторов, от которых зависит значение индукционного тока.*

Удерживая катушку и магнит в руках, последовательно выполните опыты, перечисленные в табл. 2. Каждый раз снимайте показания миллиамперметра и заносите их в табл. 2.

Таблица 2

Номер опыта	Действия с магнитом и катушкой	Сила тока $I$ , мА
1	Быстро вводим магнит в катушку	
2	Медленно вводим магнит в катушку	
3	Быстро вводим в катушку два магнита, сложенных одноименными полюсами	
4	Медленно вводим в катушку два магнита, сложенных одноименными полюсами	

### ■ Анализ результатов эксперимента 2

Проанализируйте табл. 2 и сформулируйте вывод, в котором укажите:

1) как зависит сила индукционного тока от скорости относительного движения магнита и катушки;

2) как зависит сила индукционного тока от значения индукции внешнего магнитного поля, изменение которого послужило причиной возникновения тока в катушке.

### + Творческое задание

Продумайте и запишите план проведения экспериментов по исследованию условий возникновения индукционного тока в замкнутой катушке для случаев, когда две катушки надеты на общий сердечник (см. рис. 5–7). По возможности проведите эксперименты. Сформулируйте выводы. Для каждой катушки укажите полюсы и направление тока.

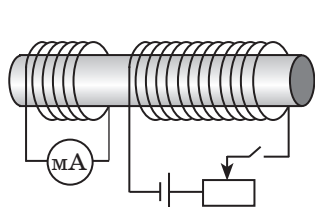


Рис. 5

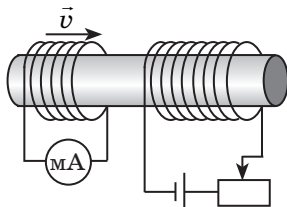


Рис. 6

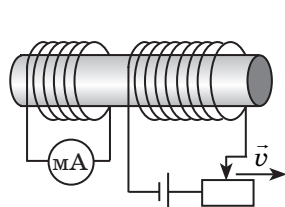


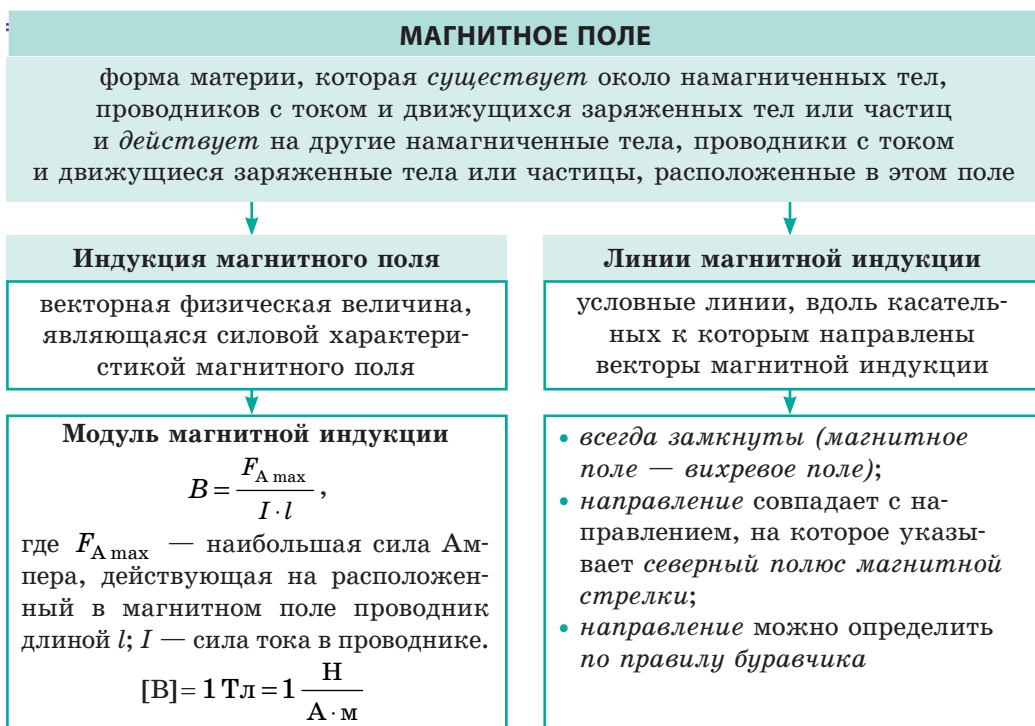
Рис. 7

## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА I «Магнитное поле»

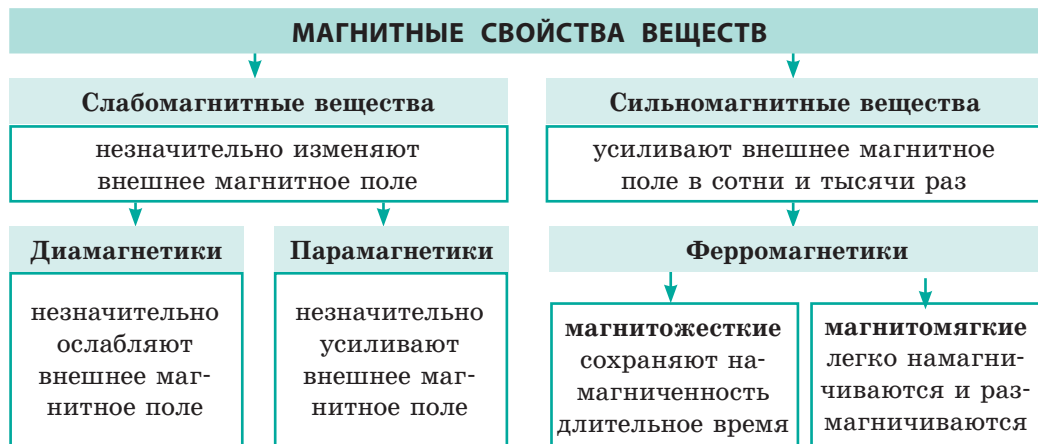
- Изучая раздел I, вы выяснили, что сначала человек узнал о *постоянных магнитах* и начал их использовать; значительно позже были созданы *электромагниты*.



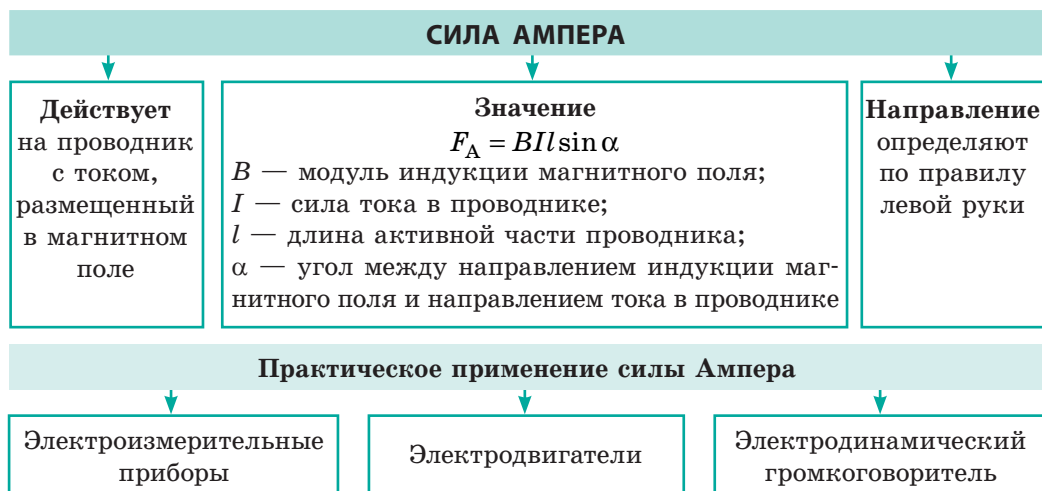
- Вы узнали, что *около намагниченного тела, подвижной заряженной частицы и проводника с током существует магнитное поле*.



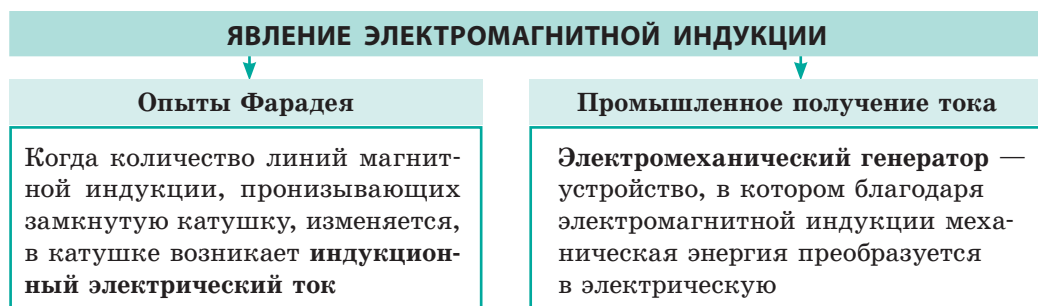
3. Вы узнали, что в магнитном поле все вещества намагничиваются, но по-разному.



4. Вы выяснили, что на проводник с током, размещенный в магнитном поле, действует сила Ампера.



5. Вы воспроизвели опыты М. Фарадея и ознакомились с явлением электромагнитной индукции.



## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ I «Магнитное поле»

Задания 1, 2, 5–7 содержат только один правильный ответ.

1. (1 балл) Южный магнитный полюс стрелки компаса обычно указывает:
  - а) на северный географический полюс Земли;
  - б) южный магнитный полюс Земли;
  - в) южный географический полюс Земли;
  - г) экватор Земли.
2. (1 балл) Магнитное поле катушки с током ослабевает, если:
  - а) в катушку ввести железный сердечник;
  - в) уменьшить силу тока;
  - б) увеличить число витков в обмотке;
  - г) увеличить силу тока.
3. (2 балла) Установите соответствие между научным фактом и опытами, благодаря которым этот факт был выявлен.
 

<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Около проводника с током существует магнитное поле</li> <li>2 Около планеты Земля существует магнитное поле</li> <li>3 Два проводника с током взаимодействуют</li> <li>4 Переменное магнитное поле создает электрическое поле</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>А Опыты А. Ампера</li> <li>Б Опыт В. Гильберта</li> <li>В Опыт Х. Эрстеда</li> <li>Г Опыт Ш. Кулона</li> <li>Д Опыты М. Фарадея</li> </ol>
---	---
4. (2 балла) Укажите *все* правильные утверждения.
  - а) Полюс магнита — это участок поверхности магнита, где магнитное действие проявляется сильнее всего.
  - б) Линии индукции однородного магнитного поля могут быть искривлены.
  - в) Единица магнитной индукции в СИ — тесла.
  - г) Ротор — это неподвижная часть двигателя.
5. (2 балла) В каком случае (рис. 1) направление линий индукции магнитного поля прямого проводника с током указано правильно?

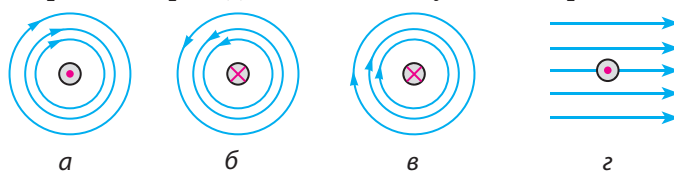


Рис. 1

6. (2 балла) В каком случае (рис. 2) направление силы Ампера указано правильно?

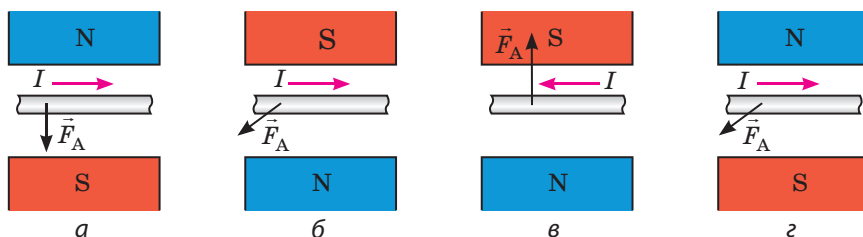


Рис. 2



7. (2 балла) Прямолинейный проводник длиной 0,6 м расположен в однородном магнитном поле индукцией 1,2 мТл под углом  $30^\circ$  к линиям магнитной индукции поля. Определите силу Ампера, действующую на проводник, если сила тока в нем 5 А.  
а) 1,8 мН;      б) 2,5 мН;      в) 3,6 мН;      г) 10 мН.
8. (2 балла) Прежде чем зерно попадает на жернова мельницы, его пропускают между полюсами сильного электромагнита. Для чего это делают?
9. (3 балла) Магнитная стрелка установилась в магнитном поле катушки с током (рис. 3). Определите полюсы источника тока.
10. (3 балла) Рамка поворачивается в магнитном поле постоянного магнита (рис. 4). Определите полюсы источника тока, к которому подключена рамка.
11. (3 балла) Проводник с током расположен в магнитном поле подковообразного магнита (рис. 5). Определите полюсы магнита.

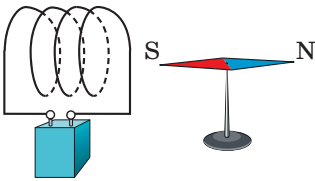


Рис. 3

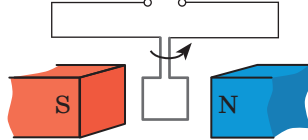


Рис. 4

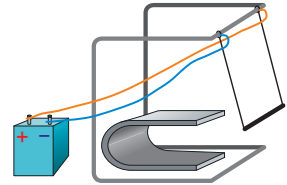


Рис. 5

12. (3 балла) Отклонится ли магнитная стрелка от направления «север — юг», если к ней поднести железный брусок? медный брусок?
13. (4 балла) Определите полюсы электромагнита на рис. 6. Как изменится подъемная сила электромагнита, если ползунок реостата передвинуть влево?
14. (4 балла) Определите направление индукционного тока в замкнутом проводящем кольце в момент замыкания ключа (рис. 7).
15. (4 балла) Стальной стержень длиной 40 см и массой 50 г лежит перпендикулярно горизонтальным рельсам (рис. 8). Вдоль рельсов направлено однородное магнитное поле индукцией 0,25 Тл. По стержню пропускают электрический ток силой 2 А. С какой силой стержень давит на рельсы?

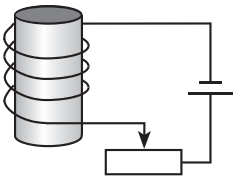


Рис. 6

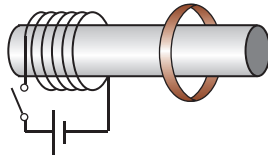


Рис. 7

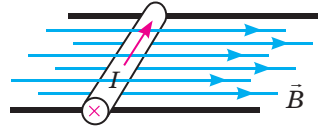


Рис. 8

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, и подсчитайте сумму баллов. Затем эту сумму разделите на три. Полученный результат будет соответствовать уровню ваших учебных достижений.



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

## От звезд к «летающим» лягушкам, или Зачем нужны сверхмощные магниты

У большинства людей магниты ассоциируются с компасом. Инженеры вспомнят об их применении в электродвигателях и генераторах электрического тока. Но все эти конструкции уже давно известны. Значит, дальнейшее изучение магнитных явлений уже не нужно?

Не спешите с ответом, вспомните, например, о поездах «без трения». Рельсами для таких поездов является магнитное поле. Два магнита, один из которых размещен в опорах, а второй — в самом поезде, обращены друг к другу одноименными полюсами, а значит, отталкиваются. В результате поезд словно «летит» над дорогой. О преимуществах такого технического решения было подробно рассказано на «Энциклопедической странице» учебника для 7 класса. Для движения поездов «без трения» применяют *сверхмощные магниты*. А какие магниты называют сверхмощными и где еще их используют?

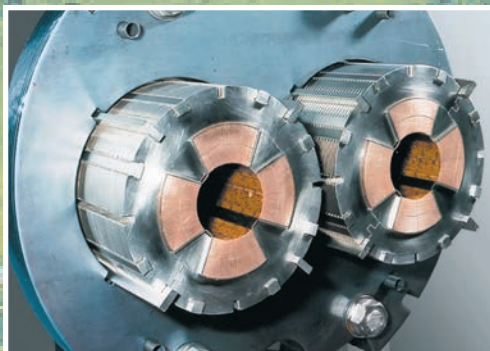
Для начала сравним индукции магнитных полей, создаваемых различными объектами. В приведенной таблице указано, во сколько раз индукция  $B$  магнитного поля данного объекта отличается от индукции  $B_3$  магнитного поля Земли. Магнитное поле Земли сравнительно слабое, тем не менее оно может повлиять на точность ряда экспериментов, и ученые научились экранировать его (снижать) в специально оборудованных помещениях — *магнитоэкранированных комнатах*. Индукция магнитного поля в такой комнате в 10 миллионов раз меньше, чем на поверхности Земли.

Как видим из таблицы, создан магнит, индукция магнитного поля которого больше индукции магнитного поля Земли в 200 000 раз. Для чего нужны такие мощные магниты?

Прежде всего сверхмощные магниты нужны для удержания пучков заряженных частиц в ускорителях. На рис. 1 изображен один из самых больших



**Рис. 1.** Один из самых больших в мире ускорителей заряженных частиц



**Рис. 2.** Сверхмощные магниты, удерживающие заряженные частицы внутри ускорителя

Относительные величины магнитных полей

Источник или участок, где измеряется индукция магнитного поля	$\left( \frac{B}{B_3} \right)$
Поверхность Земли	1
Магнитоэкранированная комната	$10^{-6}$
Школьный лабораторный магнит	200
Середина солнечного пятна	3000
Крупный электромагнит	30 000
Сверхмощный лабораторный магнит	200 000
Поверхность нейтронной звезды	$10^{12}$

в мире ускорителей. По гигантскому кольцу диаметром в несколько километров движутся заряженные частицы. Чтобы частицы «не выплескивались» на стенки, и нужны сверхмощные магниты (рис. 2).

Широко известно применение сверхмощных магнитов в медицине: с их помощью получают изображения внутренних органов человека (рис. 3, 4). В отличие от диагностики с помощью рентгеновских лучей, метод магнитного резонанса значительно безопаснее.

И наконец приведем еще один пример применения сверхмощных магнитов. Инженеры уже заставили «летать» тяжелые поезда, а можно ли научить летать человека или животное?

Оказывается, все дело в материалах. В конструкции поезда для усиления магнитного поля можно использовать ферромагнетики, а вот вещества, из которых состоит организм, таких свойств не имеют. Не вживлять же в тело «железки»!

На пути овладения левитацией помогли сверхмощные магниты. Выяснилось, что при наличии очень сильных магнитных полей даже слабого магнетизма организма достаточно для обеспечения нужной силы отталкивания. Ученым удалось заставить «летать» лягушку, поместив ее во время эксперимента над сверхмощным магнитом (рис. 5). По словам исследователей, после полета испытательница чувствовала себя нормально. Дело за «малым»: нужно увеличить магнитное поле в 10–100 раз — и человек познает пьянящее ощущение полета.



Рис. 3. Оборудование для исследования внутренних органов человека с помощью магнитного резонанса

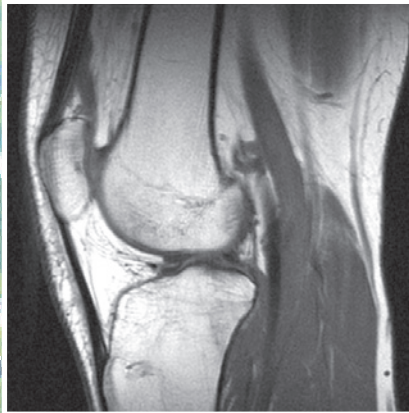


Рис. 4. Снимок сустава, полученный с использованием метода магнитного резонанса

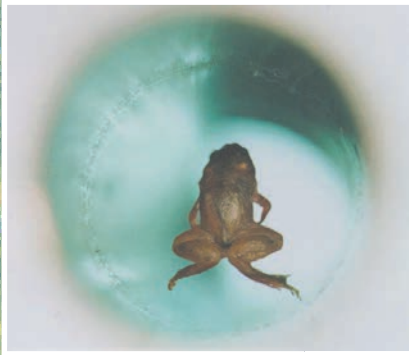


Рис. 5. «Летающая» лягушка



## Ориентировочные темы проектов

1. Магнитные материалы и их использование.
2. Магнитная запись информации.
3. Проявление и применение магнитных взаимодействий в природе и технике.
4. Геомагнитное поле Земли.
5. Магнитные бури и их влияние на здоровье человека.
6. Различные электромагнитные устройства.
7. Генераторы электрического тока.

## Темы рефератов и сообщений

1. Влияние магнитного поля на качество и скорость прорастания семян.
2. Влияние магнитного поля на жизнь и здоровье человека.
3. Сила Лоренца. Проявления силы Лоренца в природе, применение в технике.
4. История изучения магнетизма.
5. Магнитные моменты атома и его составных частей.
6. Антимагнитные вещества и их применение.
7. Вклад украинских ученых в изучение магнетизма.
8. М. Фарадей и Дж. Максвелл — основатели теории электромагнитного поля.
9. Магнитные бури в атмосфере планет-гигантов Сатурна и Урана.
10. Никола Тесла — человек, опередивший свое время.
11. Как работают ускорители заряженных частиц.
12. Что такое магнитный сепаратор и для чего он предназначен.
13. МГД-генератор: что он генерирует и как работает.
14. Что такое петля гистерезиса и как она связана с намагничиванием и перемангничиванием.
15. Магнитная жидкость: уникальные свойства, примеры применения.

## Темы экспериментальных исследований

1. Изучение свойств постоянных магнитов.
2. Исследование магнитного поля Земли.
3. Измерение магнитной индукции магнитного поля катушки с током; магнитного поля подковообразного магнита.
4. Изготовление генератора электрического тока.
5. Исследование явления электромагнитной индукции.
6. Изготовление магнитной жидкости, исследование ее свойств.
7. Изготовление электродвигателя.

# РАЗДЕЛ II

## СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- Вы неоднократно измеряли свой рост, а теперь узнаете, как, зная собственный рост, измерить высоту огромного дерева
- Вы много раз видели радугу, а теперь узнаете, как ее создать у себя дома
- Вы хорошо знаете поговорку «Ночью все кошки серы», а теперь сможете объяснить ее с точки зрения физики
- Вы понимаете, что некоторые люди не могут обойтись без очков, а теперь узнаете, почему очки помогают видеть лучше



## § 9. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ СВЕТА. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

Из пяти органов чувств больше всего информации об окружающем мире дает нам зрение. Но видеть мир вокруг мы можем только потому, что нам в глаза попадает свет. Итак, начинаем изучение световых, или оптических (греч. *optikos* — зрительный), явлений, то есть явлений, связанных со светом.

### 1 Наблюдаем световые явления

Со световыми явлениями мы сталкиваемся каждый день, ведь они являются частью природной среды, в которой мы живем.

Некоторые оптические явления кажутся нам настоящим чудом, например миражи в пустыне, полярные сияния. Но согласитесь, что и более привычные световые явления: блеск капельки росы в солнечном луче, лунная дорожка на воде, семицветный мост радуги после летнего дождя, молния в грозовых облаках, мерцание звезд в ночном небе — тоже удивительны, ведь они делают мир вокруг нас прекрасным, полным волшебной красоты и гармонии.

### 2 Выясняем, что такое источники света

**Источники света** — это физические тела, частицы (атомы, молекулы, ионы) которых излучают свет.

Посмотрите вокруг, обратитесь к своему опыту — и вы, без сомнения, назовете много источников света: звезда, вспышка молнии, пламя свечи, лампа, монитор компьютера и т. д. (см., например, [рис. 9.1](#)). Свет могут излучать и организмы: светлячки — яркие точки света, которые можно увидеть теплыми летними ночами в лесной траве, некоторые морские животные, радиолярии и др.

В ясную лунную ночь можно достаточно хорошо видеть предметы, освещенные лунным светом. Однако Луну нельзя считать источником света, ведь она не излучает, а только отражает свет, идущий от Солнца.

**?** Можно ли назвать источником света зеркало, с помощью которого вы пускаете «солнечный зайчик»? Поясните свой ответ.



Рис. 9.1. Некоторые источники света



### 3 Различаем источники света

В зависимости от происхождения различают **естественные** и **искусственные** (созданные человеком) источники света.

К *естественным источникам света* относятся Солнце и звезды, раскаленная лава и полярное сияние, некоторые живые организмы (глубоководная каракатица, светящиеся бактерии, светлячки) и т. д.

Еще в древности люди начали создавать *искусственные источники света*. Сначала это были костры, лучины, позже — факелы, свечи, масляные и керосиновые лампы; в конце XIX в. была изобретена электрическая лампа. Сегодня разные виды электрических ламп используются повсюду (рис. 9.2, 9.3).

**?** Какие виды электрических ламп используют в жилых домах? Какие лампы применяют для разноцветной иллюминации?

Различают также **тепловые** и **люминесцентные** источники света.

*Тепловые источники* излучают свет благодаря тому, что имеют высокую температуру (рис. 9.4).

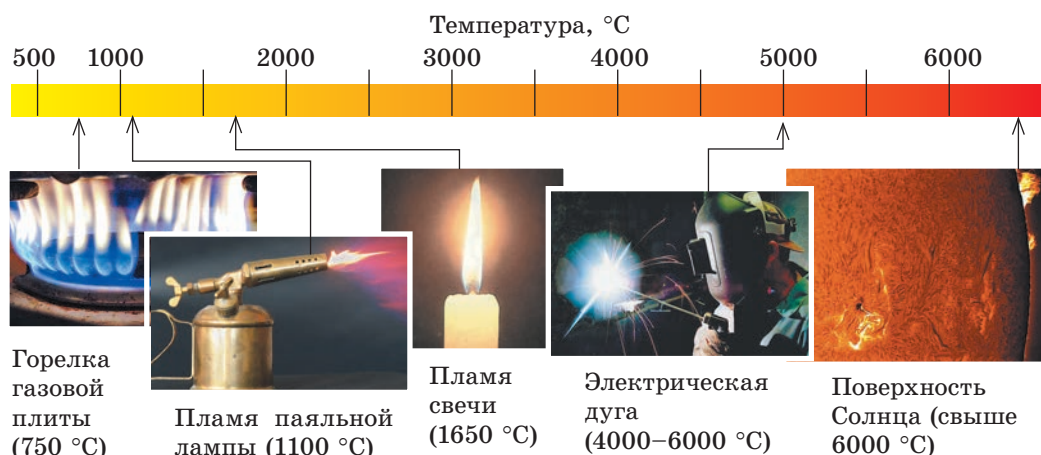
Для свечения *люминесцентных источников света* не нужна высокая температура: световое излучение может быть достаточно интенсивным, а источник при этом остается относительно холодным. Примерами люминесцентных источников света могут быть полярное сияние и морской планктон, экран телефона, лампа дневного света, покрытый люминесцентной краской дорожный знак и т. д.



**Рис. 9.2.** Мощные источники искусственного света — галогенные лампы в фарах современного автомобиля



**Рис. 9.3.** Сигналы современных светофоров хорошо заметны даже при ярком солнце. В таких светофорах лампы накаливания заменены светодиодными



**Рис. 9.4.** Некоторые тепловые источники света

#### 4 Изучаем точечные и протяженные источники света

Источник света, который излучает свет одинаково во всех направлениях и размерами которого, учитывая расстояние до места наблюдения, можно пренебречь, называют **точечным источником света**.

Наглядный пример точечных источников света — звезды: мы наблюдаем их с Земли, то есть с расстояния, которое в миллионы раз превышает размеры самих звезд.

Источники света, которые не являются точечными, называют *протяженными источниками света*. В большинстве случаев мы имеем дело именно с протяженными источниками света. Это и лампа дневного света, и экран мобильного телефона, и пламя свечи, и огонь костра.

В зависимости от условий один и тот же источник света может считаться как протяженным, так и точечным.



Рис. 9.5. К заданию в § 9

? На рис. 9.5 изображен светильник для ландшафтного освещения сада. Как вы думаете, в каком случае этот светильник можно считать точечным источником света?

#### 5 Характеризуем приемники света

**Приемники света** — это устройства, которые изменяют свои свойства под действием света и с помощью которых можно выявить световое излучение.

Приемники света бывают *искусственные* и *естественные*. В любом приемнике света энергия светового излучения преобразуется в другие виды энергии — тепловую, которая проявляется в нагревании тел, поглощающих свет, электрическую, химическую и даже механическую. В результате таких преобразований приемники определенным образом реагируют на свет или его изменение.

Например, некоторые системы охраны работают на *фотоэлектрических приемниках света* — **фотоэлементах**. Пучки света, пронизывающие пространство вокруг охраняемого объекта, направлены на фотоэлементы (рис. 9.6). Если перекрыть один из таких пучков, фотоэлемент не получит световую энергию и сразу об этом «сообщит».

В солнечных батареях фотоэлементы преобразуют энергию света в электрическую энергию. Многие современные солнечные электростанции — это большие «энергетические поля» из солнечных батарей.

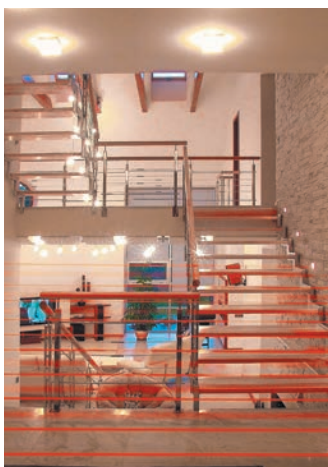


Рис. 9.6. В современных системах охраны используют чувствительные фотоэлементы

Долгое время для получения фотографий применяли только *фотохимические приемники света* (фотопленку, фотобумагу), в которых в результате действия света происходят определенные химические реакции (рис. 9.7).

В современных цифровых фотоаппаратах вместо фотопленки используют матрицу, состоящую из большого количества фотоэлементов. Каждый из таких элементов принимает «свою» часть светового потока, преобразует ее в электрический сигнал и передает этот сигнал в определенное место экрана.

*Естественными приемниками света* являются глаза живых существ (рис. 9.8). Под воздействием света в сетчатке глаза происходят определенные химические реакции, возникают нервные импульсы, вследствие чего мозг формирует представление об окружающем мире.



**Рис. 9.7.** Фотопленка и фотобумага — фотохимические приемники света



**Рис. 9.8.** Глаза живых существ — это естественные приемники света

## 6 Узнаём о скорости распространения света

Когда вы смотрите на звездное небо, то вряд ли догадываетесь, что некоторые звезды уже погасли. Более того, несколько поколений наших предков любовались этими же звездами, а эти звезды не существовали уже тогда! Как может быть так, что свет от звезды есть, а самой звезды нет?

Дело в том, что свет распространяется в пространстве с конечной скоростью. Скорость  $c$  распространения света огромна, и в вакууме она составляет около трехсот тысяч километров в секунду:

$$c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}} *$$

Свет преодолевает многокилометровые расстояния за тысячные доли секунды. Именно поэтому, если расстояние от источника света до приемника невелико, кажется, что свет распространяется мгновенно. А вот от далеких звезд свет идет к нам тысячи и миллионы лет.

От ближайшей к нам звезды Альфа Центавра свет идет к Земле почти 4 года. Значит, когда мы смотрим на эту звезду, на самом деле видим, какой она была 4 года назад. А ведь существуют галактики, удаленные от нас на миллионы световых лет (то есть свет идет к ним миллионы лет!). Представьте себе, что в такой галактике существует высокотехнологичная цивилизация. Тогда получается, что они видят нашу планету такой, какой она была во времена динозавров!



\* При решении задач мы будем использовать приближительное значение скорости распространения света в вакууме:  $c = 300\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



### Подводим итоги

Физические тела, атомы и молекулы которых излучают свет, называют источниками света. Источники света бывают тепловые и люминесцентные; естественные и искусственные; точечные и протяженные. Например, полярное сияние — естественный протяженный люминесцентный источник света.

Устройства, которые изменяют свои параметры в результате действия света и с помощью которых можно выявить световое излучение, называют приемниками света. В приемниках света энергия светового излучения преобразуется в другие виды энергии. Органы зрения живых существ — естественные приемники света.

Свет распространяется в пространстве с конечной скоростью. Скорость распространения света в вакууме составляет примерно:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.



### Контрольные вопросы

1. Какую роль играет свет в жизни человека? 2. Дайте определение источника света. Приведите примеры. 3. Является ли Луна источником света? Поясните свой ответ. 4. Приведите примеры естественных и искусственных источников света. 5. Что общего у тепловых и люминесцентных источников света? Чем они отличаются? 6. При каких условиях источник света считают точечным? 7. Какие устройства называют приемниками света? Приведите примеры естественных и искусственных приемников света. 8. Какова скорость распространения света в вакууме?



### Упражнение № 9

1. Установите соответствие между источником света (см. рисунок) и его видом.  
 А естественный тепловой  
 Б искусственный тепловой  
 В естественный люминесцентный  
 Г искусственный люминесцентный



1 Телефон



2 Факел



3 Светлячок

2. Для каждой строки определите «лишнее» слово или словосочетание.  
 а) пламя свечи, Солнце, звезда, Луна, светодиодная лампа;  
 б) экран включенного компьютера, молния, лампа накаливания, факел;  
 в) лампа дневного света, пламя газовой горелки, костер, радиоярля.
3. За какое приблизительно время свет проходит расстояние от Солнца до Земли — 150 млн км?
4. В каких из указанных случаев Солнце можно считать точечным источником света?  
 а) наблюдение солнечного затмения;  
 б) наблюдение Солнца с космического корабля, летящего за пределами Солнечной системы;  
 в) определение времени с помощью солнечных часов.
5. Одна из единиц длины, применяемая в астрономии, — *световой год*. Сколько метров составляет световой год, если он равен расстоянию, которое проходит свет в вакууме за один год?
6. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, кто и как впервые измерил скорость распространения света.



## § 10. СВЕТОВОЙ ЛУЧ И СВЕТОВОЙ ПУЧОК. ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. СОЛНЕЧНОЕ И ЛУННОЕ ЗАТМЕНИЯ

Оказывается, когда вы играете в прятки или пускаете «солнечных зайчиков», то пользуетесь законом прямолинейного распространения света. Выясним, в чем заключается этот закон и какие явления он объясняет.

### 1 Учимся различать пучок света и световой луч

Для наблюдения световых пучков нам не нужно никакого специального оборудования (рис. 10.1). Достаточно, например, или открыть дверь в темный коридор из освещенной комнаты, или включить в темноте фонарик, или в ясный солнечный день неплотно сдвинуть в комнате шторы. *Пучки света* в первом случае падают на пол через дверной проем; во втором случае свет направляется рефлектором фонарика; в последнем случае пучки света попадают в комнату через щель между шторами.

В реальной жизни мы имеем дело только с пучками света. При этом для нас привычно, когда говорят: луч солнца, луч прожектора, зеленый луч и т. п. На самом деле, с точки зрения геометрической оптики, которую вы будете изучать в этом учебном году, правильно было бы говорить: пучок солнечных лучей, пучок зеленых лучей и т. д. А вот для схематического изображения световых пучков используют световые лучи (см. рис. 10.2).

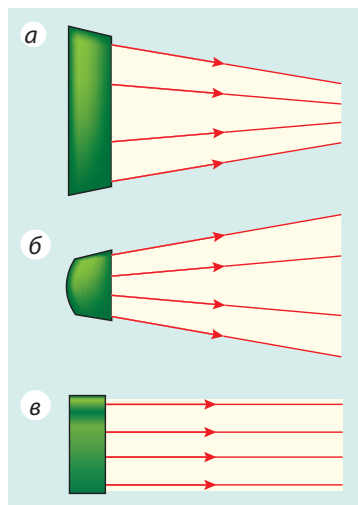
**Световой луч** — это линия, указывающая на направление распространения энергии света.

Таким образом, если далее в тексте будут встречаться фразы, словосочетания типа «луч света падает», «преломление луча» и т. п., следует иметь в виду, что речь идет о пучке света, направление которого задано данным лучом.

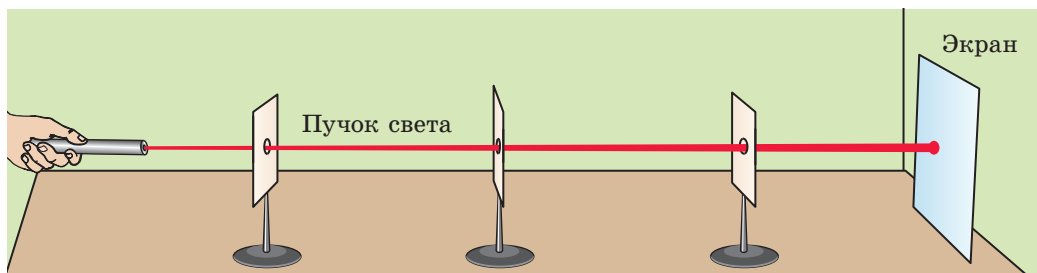
**?** Рассмотрите рис. 10.1 и 10.2. К какому виду световых пучков относится пучок солнечных лучей? *Подсказка:* вспомните, как выглядят железнодорожные рельсы для наблюдателя, стоящего на железнодорожном полотне и смотрящего на рельсы в даль.



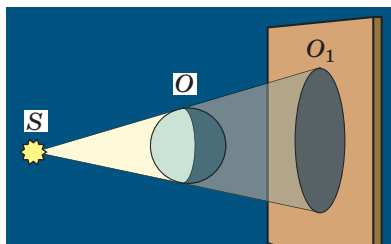
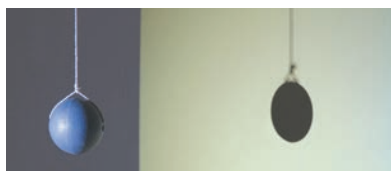
**Рис. 10.1.** Пучки солнечного света, пробивающиеся сквозь тучи



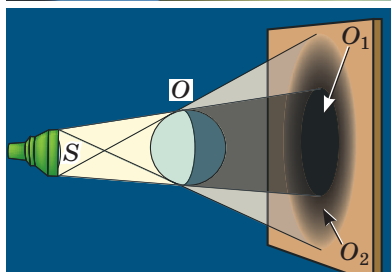
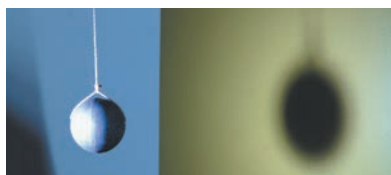
**Рис. 10.2.** Световой пучок — это совокупность световых лучей. Световые пучки: а — сходящийся; б — расходящийся; в — параллельный



**Рис. 10.3.** Опыт, демонстрирующий прямолинейное распространение света



**Рис. 10.4.** Образование полной тени  $O_1$  от предмета  $O$ , освещенного точечным источником света  $S$



**Рис. 10.5.** Образование полной тени  $O_1$  и полутени  $O_2$  от предмета  $O$ , освещенного протяженным источником света  $S$

## 2 Убеждаемся в прямолинейности распространения света

Проведем простой опыт. Расположим источник света, несколько листов картона с отверстиями (диаметром примерно 5 мм) и экран так, чтобы на экране появилось пятно света (рис. 10.3). Если теперь взять, например, спицу, она легко пройдет сквозь все отверстия, то есть окажется, что отверстия расположены на одной прямой.

Данный опыт демонстрирует **закон прямолинейного распространения света**:

В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Об этом законе еще более 2500 лет назад писал древнегреческий ученый *Евклид*. В геометрии понятия луча и прямой линии возникли на основе представления о световых лучах.

## 3 Узнаём о полной тени и полутени

Прямолинейностью распространения света можно объяснить тот факт, что любое непрозрачное тело, освещенное источником света, отбрасывает тень.

Если источник света точечный, тень от предмета будет четкой. В данном случае образуется только *полная тень* (рис. 10.4).

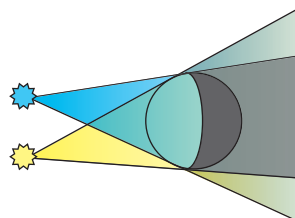
**Полная тень** — это область пространства, в которую не попадает свет от источника.

Если тело освещено протяженным источником света, образуется тень с нечеткими контурами, то есть образуется не только полная тень, а еще и *полутень* (рис. 10.5).



**Полутень** — это область пространства, освещенная некоторыми из имеющихся точечных источников света или частью протяженного источника.

**?** Видим ли мы свет от источника, находясь в области полной тени? полутени? Каким будет контур полутени (четким или размытым), если предмет освещен двумя точечными источниками света (см. рис. 10.6)?

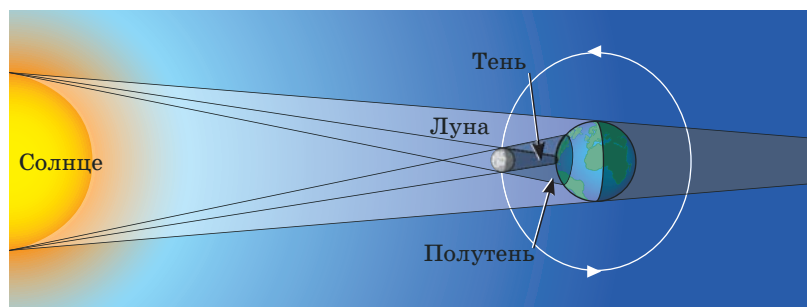


**Рис. 10.6.** К заданию в § 10

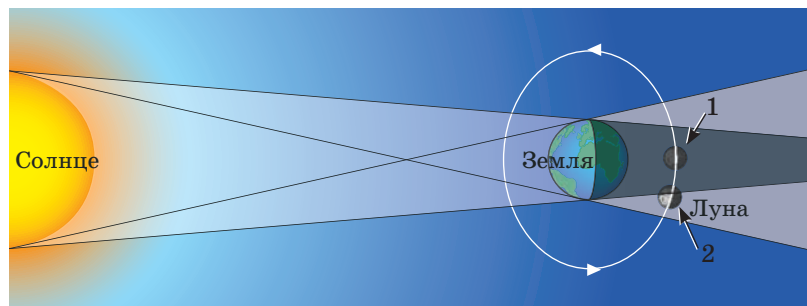
Образование полной тени и полутени в космических масштабах мы наблюдаем во время солнечных и лунных затмений.

Дело в том, что из-за вращения Луны вокруг Земли бывает так, что Луна, Солнце и Земля оказываются на одной прямой. Если при этом Луна расположена между Солнцем и Землей, то тень от Луны падает на Землю, — на Земле наблюдается **солнечное затмение** (рис. 10.7). В тех местах Земли, на которые упала полная тень Луны, наблюдается *полное солнечное затмение*, а в местах полутени — *частичное солнечное затмение*. За год на Земле наблюдается 2–5 солнечных затмений.

Когда Луна, вращаясь вокруг Земли, попадает в зону тени, которую отбрасывает Земля, наступает **лунное затмение** (рис. 10.8). За год на Земле наблюдается 2–4 лунных затмения.



**Рис. 10.7.** Солнечное затмение: *а* — полное (в области полной тени), *б* — частичное (в области полутени)

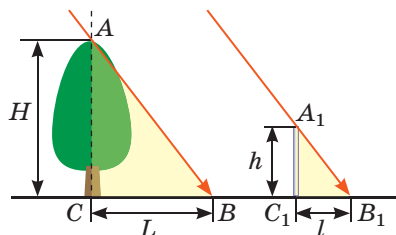


**Рис. 10.8.** Лунное затмение: *а* — полное (Луна в положении 1); *б* — частичное (Луна в положении 2)

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача.** В солнечный день длина тени от вертикально поставленной метровой линейки равна 24 см, а длина тени от дерева — 3,6 м. Определите высоту дерева.

*Анализ физической проблемы.* Для решения задачи воспользуемся законом прямолинейного распространения света. Выполним пояснительный рисунок; отметим, что пучок света, идущий от Солнца, является параллельным.



*Дано:*

$$h = 1 \text{ м}$$

$$l = 24 \text{ см} = 0,24 \text{ м}$$

$$L = 3,6 \text{ м}$$

*Найти:*

$H$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Из рисунка видим, что  $\triangle ACB \sim \triangle A_1C_1B_1$ .

Из подобия треугольников имеем:  $\frac{H}{h} = \frac{L}{l} \Rightarrow H = \frac{h \cdot L}{l}$ .

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[H] = \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{м}; \quad H = \frac{1 \cdot 3,6}{0,24} = \frac{360}{24} = \frac{30}{2} = 15 \text{ (м)}.$$

*Ответ:*  $H = 15 \text{ м}$ .



#### Подводим итоги

В прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно. Линию, указывающую направление распространения энергии света, называют световым лучом.

Из-за того что свет распространяется прямолинейно, непрозрачные тела отбрасывают тень (полную тень, полутень).

Полная тень — область пространства, в которую не попадает свет от источника (источников) света. Полутень — область пространства, освещенная некоторыми из имеющихся точечных источников света или частью протяженного источника.

Во время солнечных и лунных затмений наблюдается образование тени и полутени в космических масштабах.



Первыми приборами для измерения времени были *солнечные часы*. Действие солнечных часов основано на том, что длина и расположение тени от освещаемого солнцем предмета изменяются в течение дня.

Любые солнечные часы состоят из *кадрана* (плоская поверхность с нанесенным на нее циферблатом) и *гномона* (небольшой стержень из металла, пластика или дерева, закрепленный на кадране).



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение светового луча.
2. Сформулируйте закон прямолинейного распространения света.
3. Какие опыты и явления подтверждают прямолинейность распространения света?
4. При каких условиях будет наблюдаться только полная тень от предмета, а при каких — полная тень и полутень?
5. Когда на Земле наблюдается полное солнечное затмение? частичное солнечное затмение?
6. Когда на Земле наблюдается полное лунное затмение? частичное лунное затмение?



### Упражнение № 10

1. Глаз наблюдателя расположен в точке  $A$  перед щелью (рис. 1). Перенесите рисунок в тетрадь и найдите построением, какую часть дерева видит наблюдатель. В какой точке он будет видеть дерево полностью?
2. Мяч освещен двумя точечными источниками света  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 2). Перенесите рисунок в тетрадь, изобразите тень и полутень, которые отбрасывает мяч на экран.

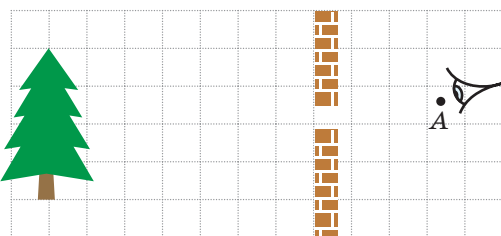


Рис. 1

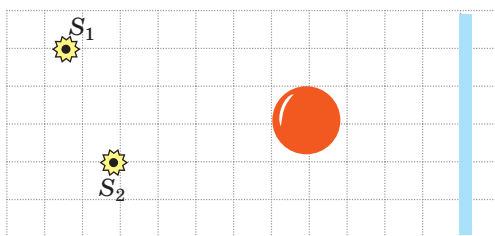


Рис. 2

3. Во время солнечного затмения на поверхности Земли образуются тень и полутень Луны (рис. 3,  $a$ ). На рис. 3,  $b$ – $г$  приведены фотографии этого затмения, сделанные в разных точках Земли. Какая фотография сделана в точке 1? в точке 2? в точке 3?

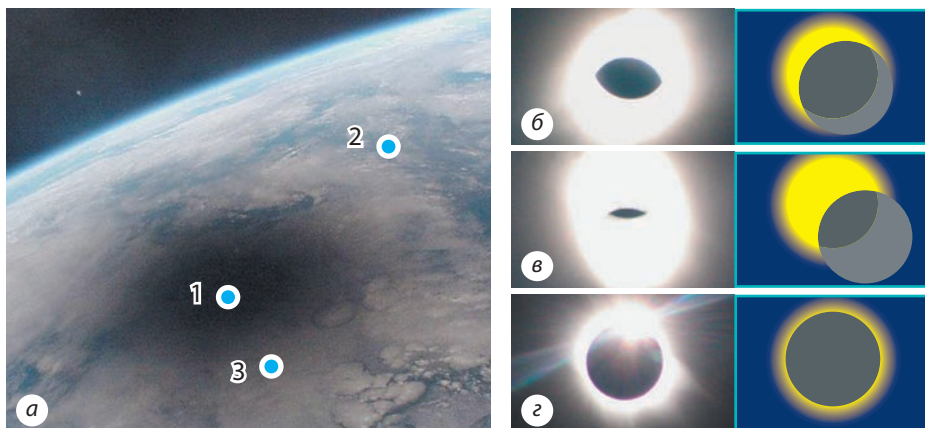


Рис. 3

4. Электрическая лампа, имеющая форму шара диаметром 6 см, расположена на расстоянии 1 м от экрана. На каком наименьшем расстоянии от экрана следует разместить теннисный шарик диаметром 40 мм, чтобы он не отбрасывал тень на экран, а давал только полутень?

5. Почему самолет, летящий на большой высоте, не образует тени даже в солнечный день? Поясните свой ответ, выполнив соответствующий рисунок.
6. Космонавт, находясь на Луне, наблюдает Землю. Что увидит космонавт в тот момент, когда на Земле будет полное лунное затмение? частичное затмение Луны?
7. Почему лунное затмение мы наблюдаем чаще, чем солнечное, ведь их количество за год почти одинаково?
8. Прямую аллею парка освещает электрический фонарь. Предложите способ оценить высоту, на которой расположен фонарь, без приборов для измерения длины. *Подсказка:* вы сами находитесь на этой аллее и знаете свой рост.
9. На рис. 4 изображен прямоугольный треугольник. Катет  $a$  равен 5 см, угол  $\alpha$  —  $30^\circ$ . Определите длины гипотенузы и второго катета. Решите задачу двумя способами.

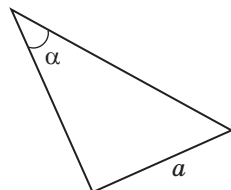
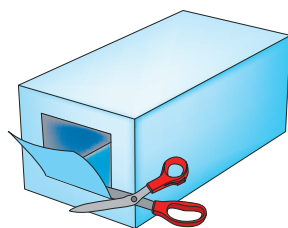


Рис. 4

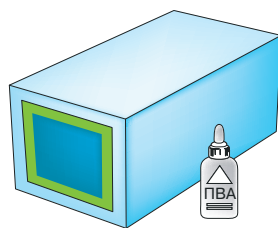


### Экспериментальные задания

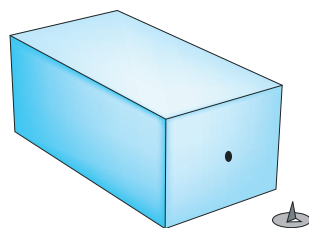
1. Расположите свечу или настольную лампу на расстоянии 30–40 см от стены. Между стеной и свечой поместите ладонь. Изменяя расстояние от свечи до ладони, наблюдайте изменения, происходящие на стене. Опишите и поясните свои наблюдения.
2. Предложите способ, как, используя булавки, можно проверить, является ли прямая линия, проведенная на картоне.
3. Изготовьте *камеру-обскуру* (от лат. *camera* — комната, *obscura* — темная), или, как ее еще называют, пинхол-камеру (от англ. *pinhole camera* — камера с отверстием). Схема действия этого устройства найдена в трудах *Аристотеля* (IV в. до н. э.) и китайского философа *Мо Ту* (V в. до н. э.). Камеру-обскуру считают «предшественницей» современного фотоаппарата. Для изготовления камеры:
  - 1) возьмите картонную коробку и сделайте экран: вырежьте в одной из стенок коробки небольшое окошко (рис. 5, *a*) и заклейте его калькой (рис. 5, *б*);
  - 2) на противоположной стороне коробки сделайте отверстие диаметром примерно 1 мм (рис. 5, *в*).



*a*



*б*



*в*

Рис. 5

В затемненном помещении наведите отверстие в камере на зажженную свечу и получите изображение пламени на экране. Какое это изображение — прямое или перевернутое, увеличенное или уменьшенное, четкое или размытое? Вспомните закон прямолинейного распространения света и объясните, как образуется это изображение.

## § 11. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА. ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

Большинство окружающих вас объектов: дома, деревья, ваши одноклассники и т. д. — не являются источниками света. Но вы их видите. Ответ на вопрос «Почему так?» вы найдете в этом параграфе.

### 1 Выясняем, почему мы видим тела, не являющиеся источниками света

Вы уже знаете, что в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно. А что происходит, если на пути пучка света находится какое-то тело? Часть света может пройти *сквозь* тело, если оно прозрачное, часть *поглотится*, а часть обязательно *отразится* от тела. Некоторые отраженные лучи попадут нам в глаза, и мы увидим это тело (рис. 11.1).

### 2 Устанавливаем законы отражения света

Чтобы установить законы отражения света, воспользуемся специальным прибором — *оптической шайбой*\*. В центре шайбы закрепим зеркало и направим на него узкий пучок света так, чтобы он давал на поверхности шайбы светлую полосу. Видим, что пучок света, отраженный от зеркала, тоже дает светлую полосу на поверхности шайбы (см. рис. 11.2).

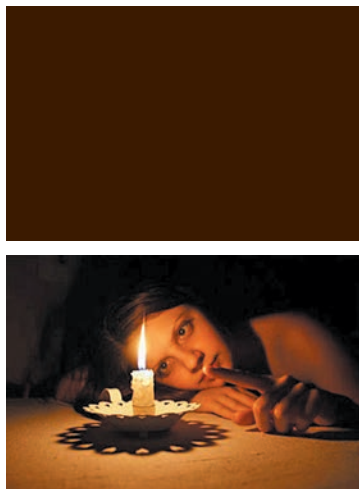
Направление падающего пучка света зададим лучом  $СО$  (рис. 11.2). Этот луч называют *падающим лучом*. Направление отраженного пучка света зададим лучом  $ОК$ . Этот луч называют *отраженным лучом*.

Из точки  $О$  падения луча проведем перпендикуляр  $ОВ$  к поверхности зеркала. Обратите внимание на то, что *падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр лежат в одной плоскости*, — в плоскости поверхности шайбы.

Угол  $\alpha$  между падающим лучом и перпендикуляром, проведенным из точки падения, называют *углом падения*; угол  $\beta$  между отраженным лучом и данным перпендикуляром называют *углом отражения*.

Измерив углы  $\alpha$  и  $\beta$ , можно убедиться, что они равны.

\* Оптическая шайба — белый диск с нанесенными делениями; на краю диска установлен осветитель.



**Рис. 11.1.** При отсутствии источника света невозможно ничего увидеть. Если есть источник света, мы видим не только сам источник, но и предметы, которые отражают свет, идущий от источника

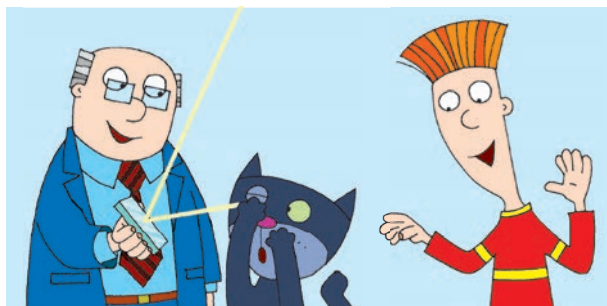


**Рис. 11.2.** Установление законов отражения света с помощью оптической шайбы:  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол отражения





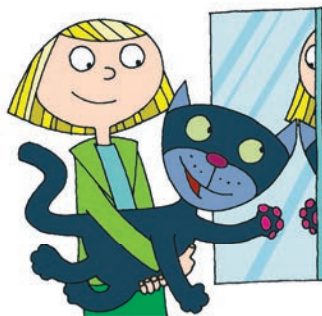
**Рис. 11.3.** С изменением угла падения света изменяется и угол отражения. Угол отражения всегда равен углу падения



**Рис. 11.4.** К заданию в § 11



**Рис. 11.5.** Демонстрация обратимости световых лучей: отраженный луч идет по пути падающего луча



**Рис. 11.6.** Подходя к зеркалу, мы видим в нем своего «двойника». Конечно, никакого «двойника» там нет — мы видим в зеркале свое отражение

Если перемещать источник света по краю диска, угол падения светового пучка будет изменяться и соответственно будет изменяться угол отражения, причем каждый раз *угол падения и угол отражения света будут равны* (рис. 11.3). Итак, мы установили **законы отражения света**:

1. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к поверхности отражения, проведенный из точки падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Угол отражения равен углу падения:  $\beta = \alpha$ .

Законы отражения света установил древнегреческий ученый Евклид еще в III в. до н. э.

**?** В каком направлении следует повернуть зеркало профессору, чтобы «солнечный зайчик» попал на мальчика (рис. 11.4)?

С помощью зеркала на оптической шайбе можно продемонстрировать также **обратимость световых лучей**: *если падающий луч направить по пути отраженного, то отраженный луч пойдет по пути падающего* (рис. 11.5).

### 3 Изучаем изображение в плоском зеркале

Рассмотрим, как создается изображение в плоском зеркале (рис. 11.6).



Пусть из точечного источника света  $S$  на поверхность плоского зеркала падает расходящийся пучок света. Из этого пучка выделим лучи  $SA$ ,  $SB$  и  $SC$ . Используя законы отражения света, построим отраженные лучи  $AA_1$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  (рис. 11.7, а). Эти лучи пойдут *расходящимся пучком*. Если продлить их в противоположном направлении (за зеркало), все они пересекутся в одной точке —  $S_1$ , расположенной за зеркалом.

Если часть отраженных от зеркала лучей попадет в ваш глаз, вам будет казаться, что отраженные лучи выходят из точки  $S_1$ , хотя в действительности никакого источника света в точке  $S_1$  нет. Поэтому точку  $S_1$  называют **мнимым изображением** точки  $S$ . *Плоское зеркало всегда дает мнимое изображение.*

Выясним, как расположены предмет и его изображение относительно зеркала. Для этого обратимся к геометрии. Рассмотрим, например, луч  $SC$ , который падает на зеркало и отражается от него (рис. 11.7, б).

Из рисунка видим, что  $\triangle SOC = \triangle S_1OC$  — прямоугольные треугольники, имеющие общую сторону  $CO$  и равные острые углы (так как по закону отражения света  $\alpha = \beta$ ). Из равенства треугольников имеем, что  $SO = S_1O$ , то есть точка  $S$  и ее изображение  $S_1$  симметричны относительно поверхности плоского зеркала.

То же можно сказать и об изображении протяженного предмета: *предмет и его изображение симметричны относительно поверхности плоского зеркала.*

Итак, нами установлены **общие характеристики изображений в плоских зеркалах**.

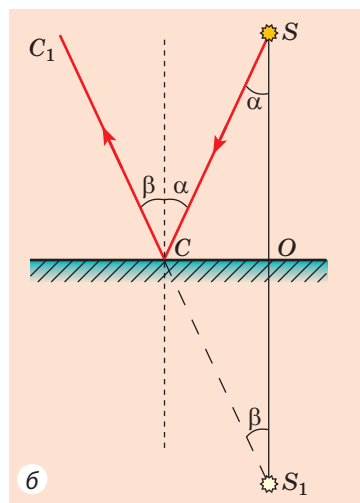
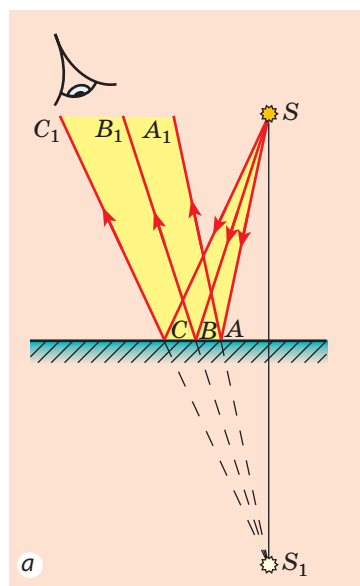
1. Плоское зеркало дает мнимое изображение предмета.

2. Изображение предмета в плоском зеркале и собственно предмет симметричны относительно поверхности зеркала, и это означает:

1) изображение предмета равно по размеру самому предмету;

2) изображение предмета расположено на том же расстоянии от поверхности зеркала, что и сам предмет;

3) отрезок, соединяющий точку на предмете и соответствующую ей точку на изображении, перпендикулярен поверхности зеркала.



**Рис. 11.7.** Получение изображения точечного источника света в плоском зеркале:  $S$  — источник света;  $S_1$  — мнимое изображение источника света

#### \* 4 Различаем зеркальное и рассеянное отражение света

Вечером, когда в комнате горит свет, мы можем видеть свое изображение в оконном стекле. Но изображение исчезает, если задернуть шторы: на ткани мы своего изображения не увидим. А почему? Ответ на этот вопрос связан по меньшей мере с двумя физическими явлениями.

Первое такое физическое явление — **отражение света**. Чтобы появилось изображение, свет должен отразиться от поверхности *зеркально*: после зеркального отражения света, идущего от точечного источника  $S$ , продолжения отраженных лучей пересекутся в одной точке  $S_1$ , которая и будет изображением точки  $S$  (рис. 11.8, *а*). Такое отражение возможно только от очень гладких поверхностей. Их так и называют — *зеркальные поверхности*. Кроме обычного зеркала примерами зеркальных поверхностей являются стекло, полированная мебель, спокойная гладь воды и т. п. (рис. 11.8, *б, в*).

Если свет отражается от шероховатой поверхности, такое отражение называют *рассеянным (диффузным)* (рис. 11.9). В этом случае отраженные лучи распространяются в разных направлениях (именно поэтому мы видим освещенный предмет с любой стороны). Понятно, что поверхностей, рассеивающих свет, намного больше, чем зеркальных.

❓ Посмотрите вокруг и назовите не менее десяти поверхностей, отражающих свет рассеянно.



Рис. 11.8. Зеркальное отражение света — это отражение света от гладкой поверхности

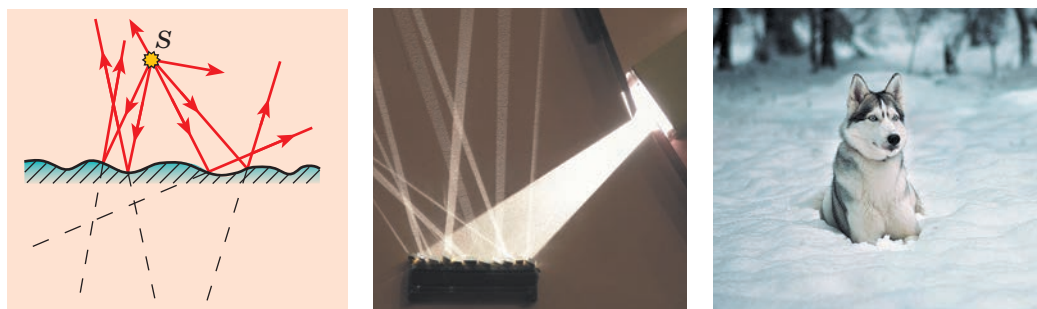



Рис. 11.9. Рассеянное (диффузное) отражение света — это отражение света от шероховатой поверхности

Второе физическое явление, влияющее на возможность видеть изображение, — это **поглощение света**. Ведь свет не только отражается от физических тел, но и поглощается ими. Лучшие отражатели света — зеркала: они могут отражать до 95 % падающего света. Хорошими отражателями света являются тела белого цвета, а вот черная поверхность поглощает практически весь свет, падающий на нее.

**?** Когда осенью выпадает снег, ночи становятся намного светлее. Почему? 

## 5 Учимся решать задачи

**Задача.** На рис. 1 схематически изображены предмет  $BC$  и зеркало  $NM$ . Найдите графически участок, из которого изображение предмета  $BC$  видно полностью.

**Анализ физической проблемы.** Чтобы видеть изображение некоторой точки предмета в зеркале, необходимо, чтобы в глаз наблюдателя отразилась хотя бы часть лучей, падающих из этой точки на зеркало. Понятно, что если в глаз отразятся лучи, исходящие из крайних точек предмета, то в глаз отразятся и лучи, исходящие из всех точек предмета.

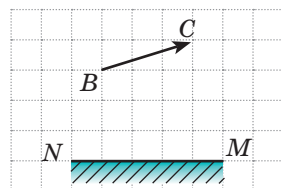


Рис. 1

### Решение, анализ результатов

1. Построим точку  $B_1$  — изображение точки  $B$  в плоском зеркале (рис. 2, а). Область, ограниченная поверхностью зеркала и лучами, отраженными от крайних точек зеркала, и будет той областью, из которой видно изображение  $B_1$  точки  $B$  в зеркале.

2. Аналогично построив изображение  $C_1$  точки  $C$ , определим область ее видения в зеркале (рис. 2, б).

3. Видеть изображение всего предмета наблюдатель может только в том случае, если в его глаз попадают лучи, которые дают оба изображения —  $B_1$  и  $C_1$  (рис. 2, в). Значит, участок, выделенный на рис. 2, в оранжевым, и есть тот участок, из которого изображение предмета видно полностью.

**?** Проанализируйте полученный результат, еще раз рассмотрите рис. 2 к задаче и предложите более простой способ найти область видения предмета в плоском зеркале. Проверьте свои предположения, построив область видения нескольких предметов двумя способами.

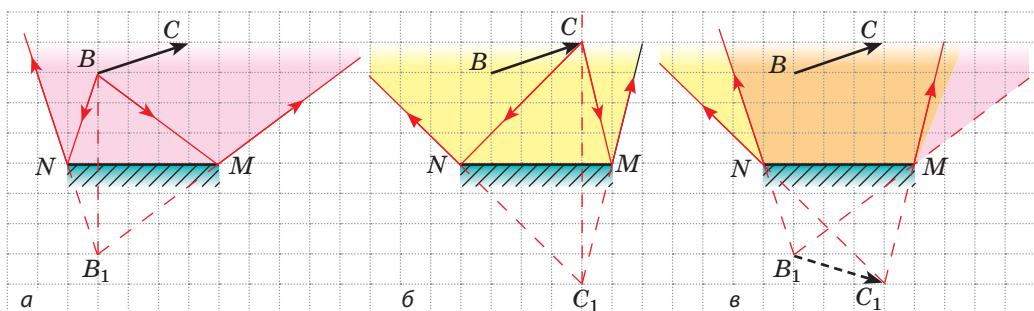


Рис. 2



### Подводим итоги

Все видимые тела отражают свет. При отражении света выполняются два закона отражения света: 1) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к поверхности отражения, проведенный из точки падения луча, лежат в одной плоскости; 2) угол отражения равен углу падения.

Изображение предмета в плоском зеркале мнимое, равное по размеру самому предмету и расположено на том же расстоянии от зеркала, что и сам предмет.

\* Различают зеркальное и рассеянное отражения света. В случае зеркального отражения мы можем видеть мнимое изображение предмета в отражающей поверхности; в случае рассеянного отражения изображение не возникает.



### Контрольные вопросы

1. Почему мы видим окружающие тела?
2. Какой угол называют углом падения? углом отражения?
3. Сформулируйте законы отражения света.
4. С помощью какого прибора можно удостовериться в справедливости законов отражения света?
5. В чем состоит свойство обратимости световых лучей?
6. В каком случае изображение называют мнимым?
7. Охарактеризуйте изображение предмета в плоском зеркале.
- \* 8. Чем рассеянное отражение света отличается от зеркального?



### Упражнение № 11

1. Девочка стоит на расстоянии 1,5 м от плоского зеркала. На каком расстоянии от девочки находится ее отражение? Охарактеризуйте его.
2. Водитель автомобиля, глянув в зеркало заднего вида, увидел пассажира, сидящего на заднем сиденье. Может ли пассажир в этот момент, глядя в то же зеркало, увидеть водителя?
3. Перенесите рис. 1 в тетрадь, для каждого случая постройте падающий (или отраженный) луч. Обозначьте углы падения и отражения.
4. Угол между падающим и отраженным лучами равен  $80^\circ$ . Чему равен угол падения луча?
5. Предмет находился на расстоянии 30 см от плоского зеркала. Затем предмет переместили на 10 см от зеркала в направлении, перпендикулярном поверхности зеркала, и на 15 см — параллельно ей. Каким было расстояние между предметом и его отражением? Каким оно стало?
6. Вы движетесь к зеркальной витрине со скоростью 4 км/ч. С какой скоростью приближается к вам ваше отражение? На сколько сократится расстояние между вами и вашим отражением, когда вы пройдете 2 м?

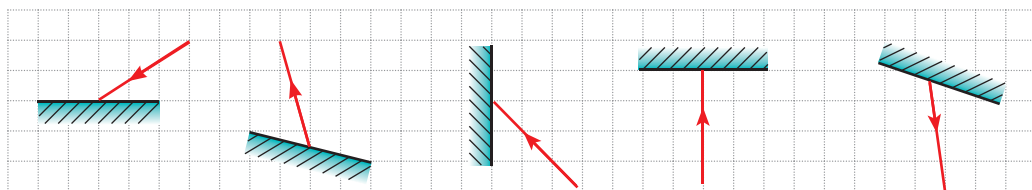


Рис. 1

7. Солнечный луч отражается от поверхности озера. Угол между падающим лучом и горизонтом в два раза больше, чем угол между падающим и отраженным лучами. Чему равен угол падения луча?
8. Девочка смотрит в зеркало, висящее на стене под небольшим углом (рис. 2).
  - 1) Постройте отражение девочки в зеркале.
  - 2) Найдите графически, какую часть своего тела видит девочка; область, из которой девочка видит себя полностью.
  - 3) Какие изменения будут наблюдаться, если зеркало постепенно закрывать непрозрачным экраном?
9. Ночью в свете фар автомобиля лужа на асфальте кажется водителю темным пятном на более светлом фоне дороги. Почему?
10. На рис. 3 показан ход лучей в *перископе* — устройстве, действие которого основано на прямолинейном распространении света. Объясните, как работает это устройство. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, где его применяют.

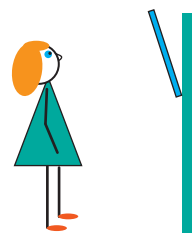


Рис. 2

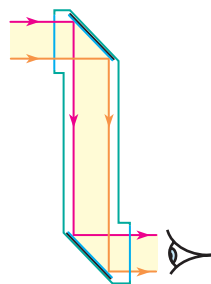
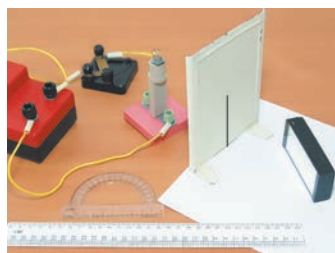


Рис. 3

## i

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3



**Тема.** Исследование отражения света с помощью плоского зеркала.

**Цель:** экспериментально проверить законы отражения света.

**Оборудование:** источник света (свеча или электрическая лампа на подставке), плоское зеркало, экран со щелью, несколько чистых белых листов бумаги, линейка, транспортир, карандаш.

## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



## Подготовка к эксперименту

1. Перед выполнением работы вспомните: 1) требования безопасности при работе со стеклянными предметами; 2) законы отражения света.
2. Соберите экспериментальную установку (рис. 1). Для этого:
  - 1) установите экран со щелью на белом листе бумаги;
  - 2) перемещая источник света, получите на бумаге полосу света;
  - 3) установите плоское зеркало под некоторым углом к полоске света и перпендикулярно листу бумаги так, чтобы отраженный пучок света тоже давал на бумаге хорошо заметную полосу.

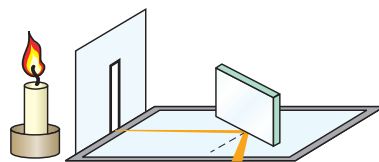


Рис. 1



### Эксперимент

Строго соблюдайте инструкцию по безопасности (см. форзац учебника).

1. Хорошо заточенным карандашом начертите на бумаге линию вдоль зеркала.
2. Поставьте на листе бумаги три точки: первую — посреди падающего пучка света, вторую — посреди отраженного пучка света, третью — в месте падения светового пучка на зеркало (рис. 2).
3. Повторите описанные действия еще несколько раз (на разных листах бумаги), устанавливая зеркало под разными углами к падающему пучку света.
4. Изменив угол между зеркалом и листом бумаги, убедитесь, что в этом случае вы не увидите отраженного пучка света.

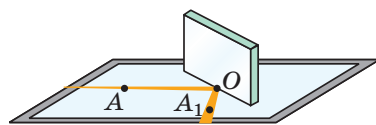


Рис. 2



### Обработка результатов эксперимента

Для каждого опыта:

- 1) постройте луч, падающий на зеркало, и отраженный луч;
- 2) через точку падения луча проведите перпендикуляр к линии, проведенной вдоль зеркала;
- 3) обозначьте и измерьте угол падения ( $\alpha$ ) и угол отражения ( $\beta$ ) света. Результаты измерений занесите в таблицу.

Номер опыта	Угол падения $\alpha$ , градусы	Угол отражения $\beta$ , градусы
1		
...		



### Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сделайте вывод, в котором укажите: 1) какое соотношение между углом падения светового луча и углом его отражения вы установили; 2) оказались ли результаты опытов абсолютно точными, а если нет, то в чем причины погрешности.



### Творческое задание

Используя рис. 3, продумайте и запишите план проведения эксперимента по определению высоты комнаты с помощью плоского зеркала; укажите необходимое оборудование. По возможности проведите эксперимент.



### Задание «со звездочкой»

Для каждого опыта оцените относительную погрешность, воспользовавшись формулой:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{\beta}{\alpha} \right| \cdot 100\%,$$

где  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол отражения.

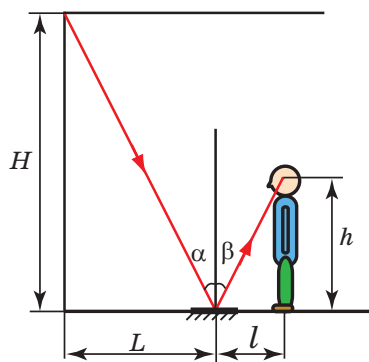


Рис. 3



## § 12. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД. ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

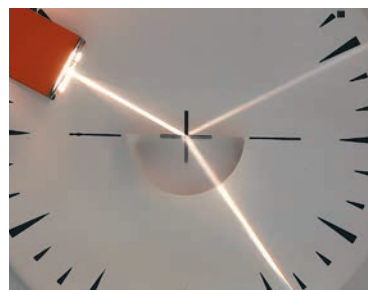
В одном из древнегреческих трактатов описан опыт: «Надо встать так, чтобы плоское кольцо, расположенное на дне сосуда, спряталось за его краем. Затем, не меняя положения глаз, налить в сосуд воду. Свет преломится на поверхности воды, и кольцо станет видимым». Такой «фокус» вы можете показать своим друзьям и сейчас (см. рис. 12.1), а вот объяснить его сможете только после изучения данного параграфа.



**Рис. 12.1.** «Фокус» с монетой. Если в чашке нет воды, мы не видим монету, лежащую на ее дне (а); если же налить воду, дно чашки будто поднимется и монета станет видимой (б)

### 1 Устанавливаем законы преломления света

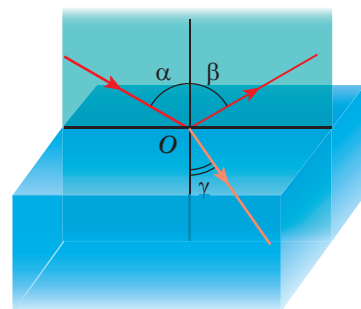
Направим узкий пучок света на плоскую поверхность прозрачного стеклянного полуцилиндра, закрепленного на оптической шайбе. Свет не только отразится от поверхности полуцилиндра, но и частично пройдет сквозь стекло. Это означает, что при переходе из воздуха в стекло направление распространения света изменяется (рис. 12.2).



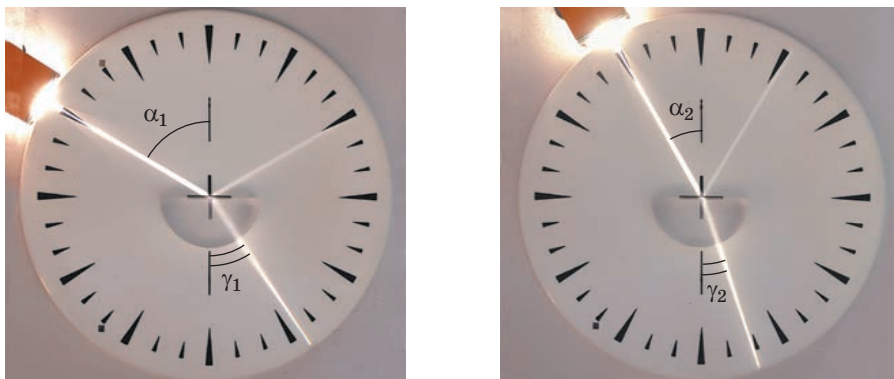
Изменение направления распространения света на границе раздела двух сред называют **преломлением света**.

Угол  $\gamma$  (гамма), который образован преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведенным через точку падения луча, называют **углом преломления**.

Проведя ряд опытов с оптической шайбой, заметим, что с увеличением угла падения угол преломления тоже увеличивается, а с уменьшением угла падения угол преломления уменьшается (рис. 12.3). Если же свет падает перпендикулярно границе раздела двух сред (угол падения  $\alpha = 0$ ), направление распространения света не изменяется.



**Рис. 12.2.** Наблюдение преломления света при его переходе из воздуха в стекло:  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол отражения;  $\gamma$  — угол преломления



**Рис. 12.3.** Установление законов преломления света: при уменьшении угла падения ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ) угол преломления тоже уменьшается ( $\gamma_2 < \gamma_1$ ), при этом  $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2}$

Первое упоминание о преломлении света можно найти в трудах древнегреческого философа *Аристотеля* (IV в. до н. э.), который задавался вопросом: «Почему палка в воде кажется сломанной?» А вот закон, количественно описывающий преломление света, был установлен только в 1621 г. голландским ученым *Виллебрордом Снеллиусом* (1580–1626).

#### **Законы преломления света:**

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный через точку падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных сред является неизменной величиной:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21},$$

где  $n_{21}$  — физическая величина, которую называют *относительным показателем преломления среды 2* (среды, в которой свет распространяется после преломления) *относительно среды 1* (среды, из которой свет падает).

## **2 Узнаём о причине преломления света**

Так почему свет, переходя из одной среды в другую, изменяет свое направление?

Дело в том, что в разных средах свет распространяется с разной скоростью, но всегда медленнее, чем в вакууме. Например, в воде скорость света в 1,33 раза меньше, чем в вакууме; когда свет переходит из воды в стекло, его скорость уменьшается еще в 1,3 раза; в воздухе скорость распространения света в 1,7 раза больше, чем в стекле, и лишь немного меньше (примерно в 1,0003 раза), чем в вакууме.

Именно *изменение скорости распространения света при переходе из одной прозрачной среды в другую является причиной преломления света.*

Принято говорить об **оптической плотности среды**: чем меньше скорость распространения света в среде (чем больше показатель преломления), тем больше оптическая плотность среды.

**?** Как вы считаете, оптическая плотность какой среды больше — воды или стекла? оптическая плотность какой среды меньше — стекла или воздуха?

### 3 Выясняем физический смысл показателя преломления

**Относительный показатель преломления** ( $n_{21}$ ) показывает, во сколько раз скорость распространения света в среде 1 больше (или меньше) скорости распространения света в среде 2:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Вспомнив второй закон преломления света:  $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ , имеем:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$$

Проанализировав последнюю формулу, делаем выводы:

1) чем больше на границе раздела двух сред изменяется скорость распространения света, тем больше свет преломляется;

2) если луч света переходит в среду с большей оптической плотностью (то есть скорость света уменьшается:  $v_2 < v_1$ ), то угол преломления меньше угла падения:  $\gamma < \alpha$  (см., например, [рис. 12.2](#), [12.3](#));

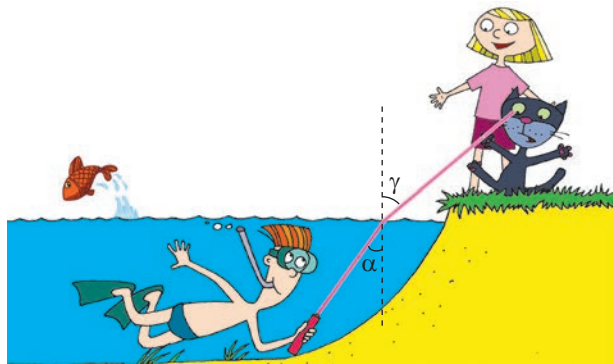
3) если луч света переходит в среду с меньшей оптической плотностью (то есть скорость света увеличивается:  $v_2 > v_1$ ), то угол преломления больше угла падения:  $\gamma > \alpha$  ([рис. 12.4](#)).

Обычно скорость распространения света в среде сравнивают со скоростью его распространения в вакууме. Когда свет попадает в среду из вакуума, показатель преломления  $n$  называют **абсолютным показателем преломления**.

**Абсолютный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость распространения света в среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v},$$

где  $c$  — скорость распространения света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с);  $v$  — скорость распространения света в среде.



**Рис. 12.4.** При переходе света из среды с большей оптической плотностью в среду с меньшей оптической плотностью угол преломления больше угла падения ( $\gamma > \alpha$ )

Среда	Абсолютный показатель преломления $n$
Воздух	1,0003
Лед	1,31
Вода	1,33
Бензин	1,50
Стекло	1,43–2,17
Кварц	1,54
Алмаз	2,42

Скорость распространения света в вакууме больше, чем в любой среде, поэтому абсолютный показатель преломления всегда больше единицы (см. таблицу).

*Обратите внимание:*  $n_{\text{воздуха}} \approx 1$ , поэтому, рассматривая переход света из воздуха в среду, будем считать, что относительный показатель преломления среды равен абсолютному.

Явление преломления света используется в работе многих оптических устройств. О некоторых из них вы узнаете позже.

#### \* 4 Применяем явление полного внутреннего отражения света

Рассмотрим случай, когда свет переходит из среды с большей оптической плотностью в среду с меньшей оптической плотностью (рис. 12.5). Видим, что при увеличении угла падения ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) угол преломления  $\gamma$  приближается к  $90^\circ$ , яркость преломленного пучка уменьшается, а яркость отраженного, наоборот, увеличивается. Понятно, что если и дальше увеличивать угол падения, то угол преломления достигнет  $90^\circ$ , преломленный пучок исчезнет, а падающий пучок полностью (без потерь энергии) вернется в первую среду — свет полностью отразится.

Явление, при котором преломление света отсутствует (свет полностью отражается от среды с меньшей оптической плотностью), называют **полным внутренним отражением света**.

Явление полного внутреннего отражения света хорошо знакомо тем, кто плавал под водой с открытыми глазами (рис. 12.6).



**Рис. 12.5.** Если свет попадает из стекла в воздух, то при увеличении угла падения угол преломления приближается к  $90^\circ$ , а яркость преломленного пучка уменьшается



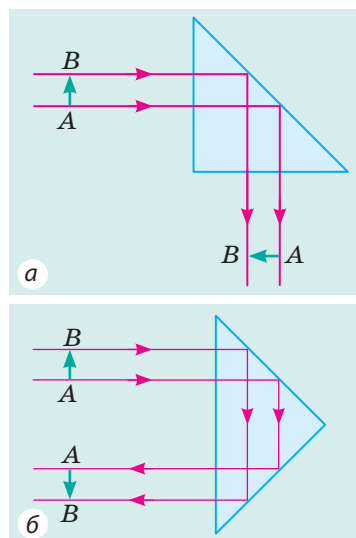
**Рис. 12.6.** Наблюдателю, находящемуся под водой, часть поверхности воды кажется блестящей, будто зеркало

Ювелиры много веков используют явление полного внутреннего отражения, чтобы повысить привлекательность драгоценных камней. Естественные камни огранявают — придают им форму многогранников: грани камня выполняют роль «внутренних зеркал», и камень «играет» в лучах падающего на него света.

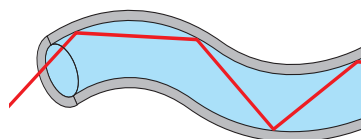
Полное внутреннее отражение широко используют в оптической технике (рис. 12.7). Но главное применение этого явления связано с **волоконной оптикой**. Если в торец сплошной тонкой «стеклянной» трубки направить пучок света, после многократного отражения свет выйдет на ее противоположном конце независимо от того, какой будет трубка — изогнутой или прямой. Такую трубку называют **световодом** (рис. 12.8).

Световоды применяют в медицине для исследования внутренних органов (эндоскопия); в технике, в частности для выявления неисправностей внутри двигателей без их разборки; для освещения солнечным светом закрытых помещений и т. п. (рис. 12.9).

Но чаще всего световоды используют в качестве кабелей для передачи информации (рис. 12.10). «Стеклянный кабель» намного дешевле и легче медного, он практически не изменяет свои свойства под воздействием окружающей среды, позволяет передавать сигналы на большие расстояния без усиления. Сегодня волоконно-оптические линии связи стремительно вытесняют традиционные. Когда вы будете смотреть телевизор или пользоваться Интернетом, вспомните, что значительную часть своего пути сигнал проходит по «стеклянной дороге». ➔



**Рис. 12.7.** Во многих оптических приборах направление распространения света изменяют с помощью *призм полного отражения*: а — призма поворачивает изображение; б — призма переворачивает изображение



**Рис. 12.8.** Распространение светового пучка в световоде



**Рис. 12.9.** Декоративный светильник со световодами



**Рис. 12.10.** Оптоволоконный кабель



## 5 Учимся решать задачи

**Задача.** Световой луч переходит из среды 1 в среду 2 (рис. 12.11, а). Скорость распространения света в среде 1 равна  $2,4 \cdot 10^8$  м/с. Определите абсолютный показатель преломления среды 2 и скорость распространения света в среде 2.

*Анализ физической проблемы*

Из рис. 12.11, а видим, что на границе раздела двух сред свет преломляется, значит, скорость его распространения изменяется.

Выполним пояснительный рисунок (рис. 12.11, б), на котором:

1) изобразим лучи, приведенные в условии задачи;

2) проведем через точку падения луча перпендикуляр к границе раздела двух сред;

3) обозначим  $\alpha$  угол падения и  $\gamma$  — угол преломления.

Абсолютный показатель преломления — это показатель преломления относительно вакуума. Поэтому для решения задачи следует вспомнить значение скорости распространения света в вакууме и найти скорость распространения света в среде 2 ( $v_2$ ).

Чтобы найти  $v_2$ , определим синус угла падения и синус угла преломления.

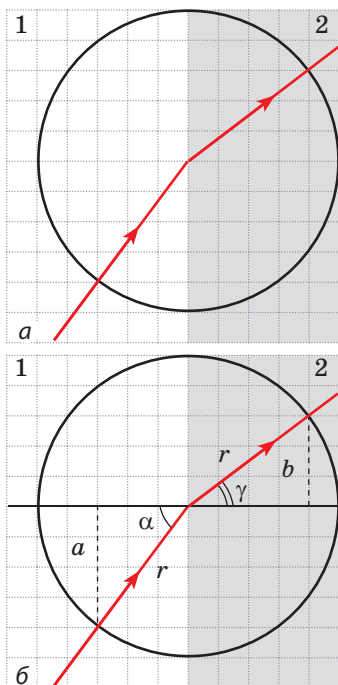


Рис. 12.11. К задаче в § 12

**Дано:**

$$v_1 = 2,4 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

**Найти:**

$$n_2 - ?$$

$$v_2 - ?$$

*Поиск математической модели, решение*

По определению абсолютного показателя преломления:

$$n_2 = \frac{c}{v_2}.$$

Поскольку  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ , то  $v_2 = \frac{v_1 \sin \gamma}{\sin \alpha}$ .

Из рис. 12.11, б видим, что  $\sin \alpha = \frac{a}{r}$ , а  $\sin \gamma = \frac{b}{r}$ , где  $r$  — радиус окружности.

Найдем значения искомых величин:

$$\sin \alpha = \frac{a}{r} = \frac{4}{5} = 0,8, \quad \sin \gamma = \frac{b}{r} = \frac{3}{5} = 0,6;$$

$$v_2 = \frac{2,4 \cdot 10^8 \cdot 0,6}{0,8} = 1,8 \cdot 10^8 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right); \quad n_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^8} = \frac{30}{18} = \frac{5}{3} \approx 1,7.$$

**Анализ решения.** По условию задачи угол падения больше угла преломления, и это значит, что скорость света в среде 2 меньше скорости света в среде 1. Следовательно, полученные результаты реальны.

**Ответ:**  $n_2 \approx 1,7$ ;  $v_2 = 1,8 \cdot 10^8$  м/с.



### Подводим итоги

Световой пучок, падая на границу раздела двух сред, разделяется на два пучка. Один из них — отраженный — отражается от поверхности, подчиняясь законам отражения света. Второй — преломленный — проходит во вторую среду, изменяя свое направление.

Законы преломления света:

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный через точку падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Для двух данных сред отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\gamma$  является неизменной величиной:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$ .

Причина преломления света — изменение скорости его распространения при переходе из одной среды в другую. Относительный показатель преломления  $n_{21}$  показывает, во сколько раз скорость распространения света в среде 1 больше (или меньше), чем скорость распространения света в среде 2:  $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}$ .

Когда свет попадает в среду из вакуума, показатель преломления  $n$  называют абсолютным показателем преломления:  $n = c/v$ .

Если при переходе света из среды 1 в среду 2 скорость распространения света уменьшилась (то есть показатель преломления среды 2 больше показателя преломления среды 1:  $n_2 > n_1$ ), то говорят, что свет перешел из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей оптической плотностью (и наоборот).



### Контрольные вопросы

1. Какие опыты подтверждают явление преломления света на границе раздела двух сред?
2. Сформулируйте законы преломления света.
3. В чем причина преломления света?
4. Что показывает показатель преломления света?
5. Как скорость распространения света связана с оптической плотностью среды?
6. Дайте определение абсолютного показателя преломления.



### Упражнение № 12

1. Перенесите рис. 1 в тетрадь. Считая, что среда 1 имеет большую оптическую плотность, чем среда 2, для каждого случая схематически постройте падающий (или преломленный) луч, обозначьте угол падения и угол преломления.

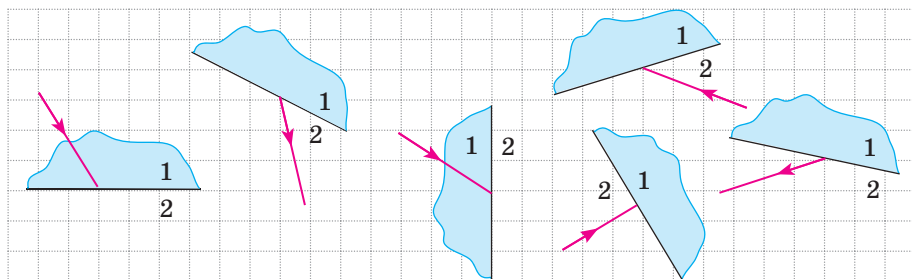


Рис. 1

2. Вычислите скорость распространения света в алмазе; воде; воздухе.
3. Луч света падает из воздуха в воду под углом  $60^\circ$ . Угол между отраженным и преломленным лучами равен  $80^\circ$ . Вычислите угол преломления луча.
4. Когда мы, стоя на берегу водоема, пытаемся на глаз определить его глубину, она всегда кажется меньше, чем на самом деле. Воспользовавшись [рис. 2](#), объясните, почему это так.
5. За какое время свет доходит от дна озера глубиной 900 м до поверхности воды?
6. Объясните «фокус» с кольцом (монетой), описанный в начале § 12 (см. [рис. 12.1](#)).
7. Световой луч переходит из среды 1 в среду 2 ([рис. 3](#)). Скорость распространения света в среде 1 равна  $2,5 \cdot 10^8$  м/с. Определите:
  - 1) какая среда имеет большую оптическую плотность;
  - 2) показатель преломления среды 2 относительно среды 1;
  - 3) скорость распространения света в среде 2;
  - 4) абсолютный показатель преломления каждой среды.
8. Следствием преломления света в атмосфере Земли является возникновение миражей, а также тот факт, что мы видим Солнце и звезды немного выше их реального положения. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте об этих природных явлениях подробнее.

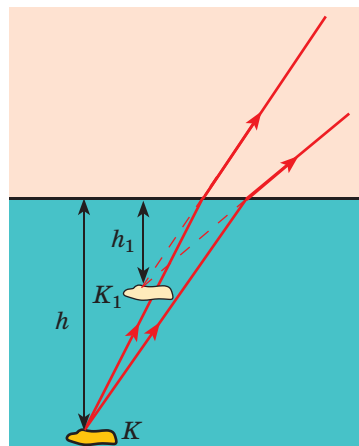


Рис. 2

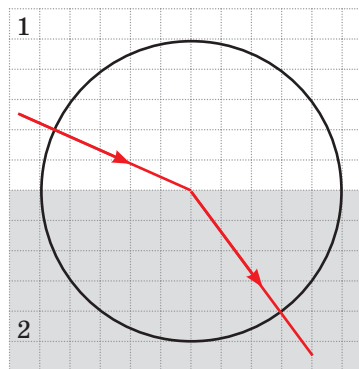


Рис. 3



### Экспериментальные задания

1. «Фокус с монетой». Продемонстрируйте кому-нибудь из своих друзей или близких опыт с монетой (см. [рис. 12.1](#)) и объясните его.
2. «Водное зеркало». Понаблюдайте полное отражение света. Для этого заполните стакан примерно наполовину водой. Опустите в стакан какой-либо предмет, например корпус пластмассовой ручки, желательно с надписью. Держа стакан в руке, расположите его на расстоянии приблизительно 25–30 см от глаз (см. [рисунк](#)). В ходе опыта вы должны следить за корпусом ручки. Сначала, подняв глаза, вы будете видеть весь корпус ручки (как подводную, так и надводную части). Медленно передвигайте от себя стакан, не изменяя высоты его расположения. Когда стакан будет достаточно удален от ваших глаз, поверхность воды станет для вас зеркальной — вы увидите зеркальное отражение подводной части корпуса ручки. Объясните наблюдаемое явление.





**Тема.** Исследование преломления света.

**Цель:** определить показатель преломления стекла относительно воздуха.

**Оборудование:** стеклянная пластинка с параллельными гранями, карандаш, угольник с миллиметровой шкалой, циркуль.

## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

### II

#### Подготовка к эксперименту

- Перед выполнением работы вспомните:
  - 1) требования безопасности при работе со стеклянными предметами;
  - 2) законы преломления света;
  - 3) формулу для определения показателя преломления.
- Подготовьте рисунки для выполнения работы (см. рис. 1). Для этого:
  - 1) положите стеклянную пластинку на страницу тетради и остро заточенным карандашом очертите контур пластинки;
  - 2) на отрезке, соответствующем положению верхней преломляющей грани пластинки:
    - отметьте точку  $O$ ;
    - проведите через точку  $O$  прямую  $k$ , перпендикулярную данному отрезку;
    - с помощью циркуля постройте окружность радиусом 2,5 см с центром в точке  $O$ ;
  - 3) под углом примерно  $45^\circ$  начертите луч, который будет задавать направление пучка света, падающего в точку  $O$ ; обозначьте точку пересечения луча и окружности буквой  $A$ ;
  - 4) повторите действия, описанные в пунктах 1–3, еще дважды (выполните еще два рисунка), сначала увеличив, а затем уменьшив заданный угол падения луча света.

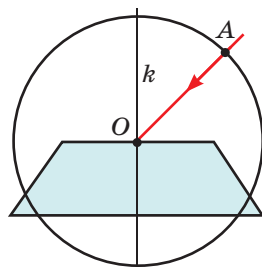


Рис. 1

### ►

#### Эксперимент

*Строго соблюдайте инструкцию по безопасности (см. форзац учебника).*

- Наложите стеклянную пластинку на первый контур.
- Глядя на луч  $AO$  сквозь стекло, у нижней грани пластинки поставьте точку  $M$  так, чтобы она казалась расположенной на продолжении луча  $AO$  (рис. 2).
- Повторите действия, описанные в пунктах 1 и 2, еще для двух контуров.

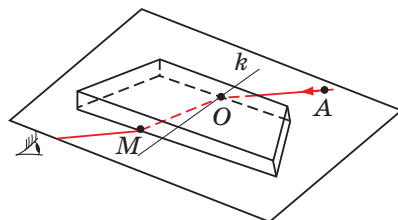


Рис. 2

### Обработка результатов эксперимента

Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.

Для каждого опыта (см. рис. 3):

- 1) проведите преломленный луч  $OM$ ;
- 2) найдите точку пересечения луча  $OM$  с окружностью (точку  $B$ );
- 3) из точек  $A$  и  $B$  опустите перпендикуляры на прямую  $k$ , измерьте длины  $a$  и  $b$  полученных отрезков и радиус окружности  $r$ ;
- 4) определите показатель преломления стекла относительно воздуха:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}, \text{ где } \sin \alpha = \frac{a}{r}, \text{ а } \sin \gamma = \frac{b}{r}, \text{ поэтому}$$

$$n = \frac{a}{b}.$$

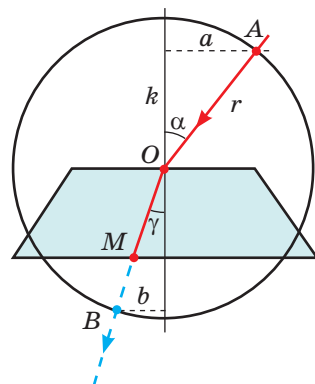


Рис. 3

Номер опыта	Длина отрезка $a$ , мм	Длина отрезка $b$ , мм	Относительный показатель преломления $n$
1			
...			

### Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором укажите: 1) какую физическую величину вы определяли; 2) какой результат получили; 3) зависит ли значение полученной величины от угла падения света; 4) в чем причины возможной погрешности эксперимента.

### + Творческое задание

Воспользовавшись рис. 4, продумайте и запишите план проведения эксперимента по определению показателя преломления воды относительно воздуха. По возможности проведите эксперимент.

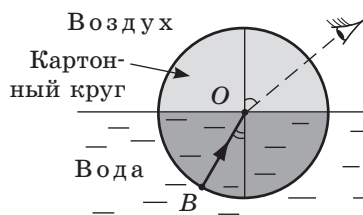


Рис. 4

### \* Задание «со звездочкой»

Для одного из опытов оцените относительную погрешность эксперимента, воспользовавшись формулой:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{n_{\text{изм}}}{n} \right| \cdot 100\%,$$

где  $n_{\text{изм}}$  — полученное во время эксперимента значение показателя преломления стекла относительно воздуха;  $n$  — табличное значение абсолютного показателя преломления стекла, из которого изготовлена пластинка (выясните у учителя).



## § 13. СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА. ЦВЕТА

Вспомните: солнечный летний день — и вдруг на небе появилась тучка, пошел дождик, который будто «не замечает», что солнце продолжает светить. Такой дождь в народе называют слепым. Дождик еще не успел закончиться, а на небе уже засияла разноцветная радуга (рис. 13.1). Почему она появилась?

### 1 Раскладываем солнечный свет в спектр

Еще в древности было замечено, что солнечный луч, пройдя сквозь стеклянную призму, становится разноцветным. Считалось, что причина этого явления — в свойстве призмы окрашивать свет. Так ли это на самом деле, выяснил в 1665 г. выдающийся английский ученый *Исаак Ньютон* (1643–1727), проведя серию опытов.

Чтобы получить узкий пучок солнечного света, Ньютон сделал небольшое круглое отверстие в ставне. Когда перед отверстием он устанавливал стеклянную призму, на противоположной стене появлялась разноцветная полоска, которую ученый назвал **спектром**. На полоске (как и в радуге), Ньютон выделил семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый (рис. 13.2, а).

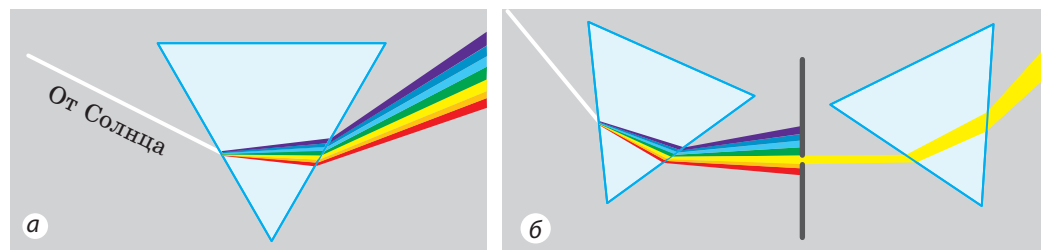
Затем ученый с помощью экрана с отверстием выделял из широкого разноцветного пучка лучей узкие одноцветные (монохроматические) пучки света и снова направлял их на призму. Такие пучки отклонялись призмой, но уже не раскладывались в спектр (рис. 13.2, б). При этом больше других отклонялся пучок фиолетового света, а меньше других — пучок красного света.

Результаты опытов позволили Ньютону сделать следующие выводы:

- 1) пучок белого (солнечного) света состоит из света разных цветов;
- 2) призма не «окрашивает» белый свет, а разделяет его (раскладывает в спектр) из-за разного преломления световых пучков разного цвета.



**Рис. 13.1.** Радугу можно наблюдать, например, в брызгах фонтана или водопада



**Рис. 13.2.** Схема опытов И. Ньютона по выяснению спектрального состава света

Сравните рис. 13.1 и 13.2: цвета радуги — это и есть цвета спектра. И это не удивительно, потому что на самом деле радуга — огромный спектр солнечного света. Одна из причин появления радуги состоит в том, что множество маленьких капелек воды преломляют белый солнечный свет.

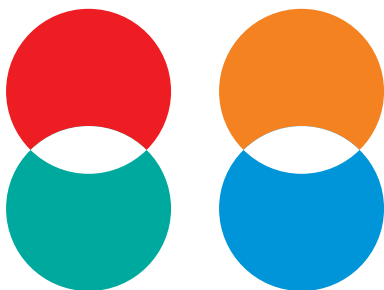


Рис. 13.3. Некоторые пары дополнительных цветов



Рис. 13.4. Если посмотреть через лупу на экран компьютера, увидим множество небольших кругов красного, зеленого и синего цветов

## \* 2 Узнаём о дисперсии света

Опыты Ньютона продемонстрировали, в частности, что, преломляясь в стеклянной призме, пучки фиолетового света всегда отклоняются больше, чем пучки красного света. Это означает, что *для световых пучков разного цвета показатель преломления стекла — разный*. Именно поэтому пучок белого света раскладывается в спектр.

Явление разложения света в спектр, обусловленное зависимостью показателя преломления среды от цвета светового пучка, называют **дисперсией света**.

Для большинства прозрачных сред наибольший показатель преломления имеет фиолетовый свет, наименьший — красный.

? Световой пучок какого цвета — фиолетового или красного — распространяется в стекле с большей скоростью? *Подсказка:* вспомните, как показатель преломления среды зависит от скорости распространения света в этой среде. ➔

## 3 Характеризуем цвета

В спектре солнечного света традиционно выделяют семь цветов, можно выделить и больше. Но вы никогда не сможете выделить, например, коричневый или сиреневый цвет. Эти цвета являются *составными* — они образуются в результате *наложения (смешения) спектральных (чистых) цветов* в разных пропорциях. Некоторые спектральные цвета при наложении друг на друга образуют белый цвет. Такие пары спектральных цветов называют *дополнительными* (рис. 13.3).

Для зрения человека особое значение имеют **три основных спектральных цвета** — *красный, зеленый и синий*: при наложении эти цвета дают самые разнообразные цвета и оттенки.

На наложении трех основных спектральных цветов в разных пропорциях основано цветное изображение на экранах компьютера, телевизора, телефона (рис. 13.4).



**Рис. 13.5.** Разные тела по-разному отражают, преломляют и поглощают солнечный свет, и благодаря этому мы видим окружающий мир разноцветным

#### 4 Выясняем, почему мир разноцветный

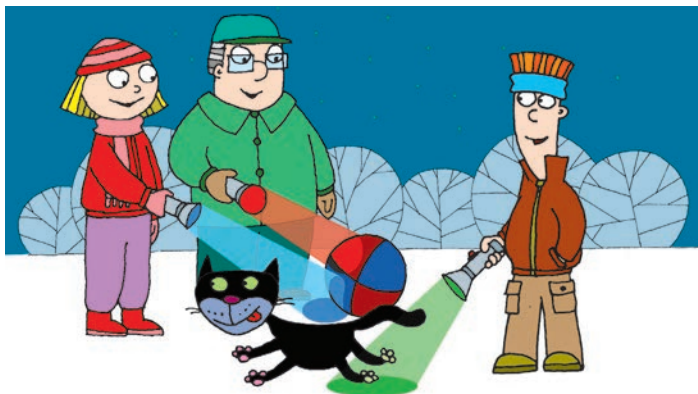
Зная, что белый свет является составным, можно объяснить, почему окружающий мир, освещенный только одним источником белого света — Солнцем, мы видим разноцветным (рис. 13.5).

Так, поверхность листа офисной бумаги одинаково хорошо отражает лучи всех цветов, поэтому лист, освещенный белым светом, кажется нам белым. Синий рюкзак, освещенный тем же белым светом, преимущественно отражает лучи синего цвета, а остальные поглощает.

**?** Как вы думаете, какой цвет преимущественно отражают лепестки подсолнечников? листья растений?

Синий свет, направленный на красные лепестки розы, почти полностью будет поглощен ими, так как лепестки отражают преимущественно красные лучи, а остальные — поглощают. Поэтому роза, освещенная синим светом, будет казаться нам практически черной. Если же синим светом осветить белый снег, он будет казаться нам синим, ведь белый снег отражает лучи всех цветов (в том числе синие). А вот черная шерсть кота хорошо поглощает все лучи, поэтому кот будет казаться черным при освещении любым светом (рис. 13.6).

Обратите внимание! Поскольку цвет тела зависит от характеристики падающего света, в темноте понятие цвета не имеет смысла.



**Рис. 13.6.** Цвет тела зависит как от оптических свойств его поверхности, так и от характеристик падающего света



### Подводим итоги

Пучок белого света состоит из света разных цветов. Выделяют семь спектральных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Показатель преломления света, а значит, скорость распространения света в среде зависят от цвета светового пучка. \* Зависимость показателя преломления среды от цвета светового пучка называют дисперсией света. ← Мы видим окружающий мир разноцветным благодаря тому, что разные тела по-разному отражают, преломляют и поглощают свет.



### Контрольные вопросы

1. Опишите опыты И. Ньютона по выяснению спектрального состава света.
2. Назовите семь спектральных цветов.
3. Световой пучок какого цвета преломляется в веществе больше других? меньше других? \*
4. Дайте определение дисперсии света. Какое природное явление связано с дисперсией?
5. Какие цвета называют дополнительными?
6. Назовите три основных цвета спектра. Почему их так называют?
7. Почему окружающий мир мы видим разноцветным?



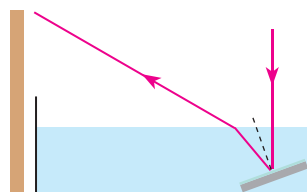
### Упражнение № 13

1. Какими будут казаться черные буквы на белой бумаге, если смотреть на них сквозь зеленое стекло? Каким при этом будет казаться цвет бумаги?
2. Свет каких цветов проходит сквозь синее стекло? поглощается им?
3. Через стекло какого цвета нельзя увидеть текст, написанный фиолетовыми чернилами на белой бумаге?
4. В воде распространяются световые пучки красного, оранжевого и голубого цветов. Скорость распространения какого пучка наибольшая?
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, почему небо голубое; почему Солнце на закате часто бывает красным.



### Экспериментальное задание

«Творцы радуги». Наполните неглубокий сосуд водой и поставьте его у светлой стены. На дне сосуда разместите под углом плоское зеркало (см. рисунок). Направьте на зеркало пучок света — на стене появится «солнечный зайчик». Рассмотрите его и объясните наблюдаемое явление.



## Физика и техника в Украине

**Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко** (КНУ) основан в ноябре 1833 г. как Императорский университет Святого Владимира. Первый ректор университета — выдающийся ученый-энциклопедист *Михаил Александрович Максимович*.

С КНУ связаны имена известных ученых — математиков, физиков, кибернетиков, астрономов: Д. А. Граве, М. Ф. Кравчука, Г. В. Пфейффера, Н. Н. Боголюбова, В. М. Глушкова, А. В. Скорохода, И. И. Гихмана, Б. В. Гнеденко, В. С. Михалевича, М. П. Авенариуса, Н. Н. Шиллера, И. И. Косоногова, А. Г. Ситенко, В. Е. Лашкарева, Р. Ф. Фогеля, М. Ф. Хандрикова, С. К. Всехсвятского.

В мире известны научные школы КНУ — алгебраическая, теории вероятностей и математической статистики, механики, физики полупроводников, физической электроники и физики поверхности, металлогеническая, оптики новых материалов и др. С 2008 г. ректор КНУ — академик НАНУ и НАПНУ, Герой Украины *Леонид Васильевич Губерский*.

## § 14. ЛИНЗЫ. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ

Скорее всего, вы пользовались фотоаппаратом, знакомы с биноклем, подзорной трубой, телескопом, на уроках биологии работали с микроскопом. Некоторые из вас носят очки. Все эти устройства имеют общее — их основной частью является линза. О том, какое значение имеют данные устройства в жизни человека, вы можете рассказать и сами, а вот о том, что такое линза, какие существуют виды линз и каковы их свойства, вы узнаете из этого параграфа.

### 1 Различаем линзы

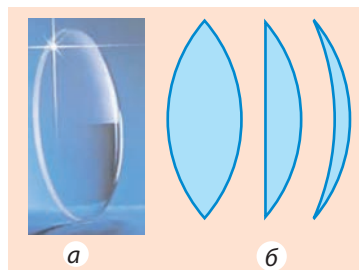
**Линза** — прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями\*.

По форме линзы делят на **выпуклые** (рис. 14.1) и **вогнутые** (рис. 14.2).

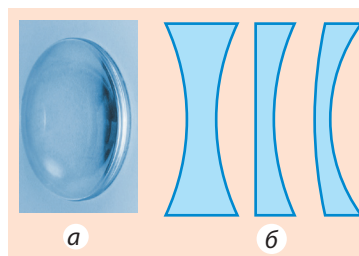
Если толщина  $d$  линзы во много раз меньше радиусов сферических поверхностей, ограничивающих линзу, такую линзу называют **тонкой**. Далее мы будем рассматривать только тонкие линзы. Прямую, которая проходит через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют **главной оптической осью линзы** (рис. 14.3).

Если на линзу направить пучок световых лучей, они преломятся на ее поверхностях и изменят свое направление. В то же время на главной оптической оси линзы есть точка, которую луч света проходит практически не изменяя своего направления. Эту точку называют **оптическим центром линзы** (см. рис. 14.3).

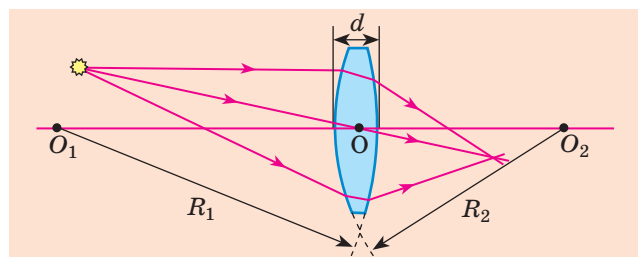
Направим на линзу пучок лучей, *параллельных ее главной оптической оси*. Если лучи, пройдя сквозь линзу, идут сходящимся пучком, такая линза — **собирающая**. Точка  $F$ , в которой



**Рис. 14.1.** Толщина выпуклой линзы посередине больше, чем у краев: а — вид; б — разные выпуклые линзы в разрезе



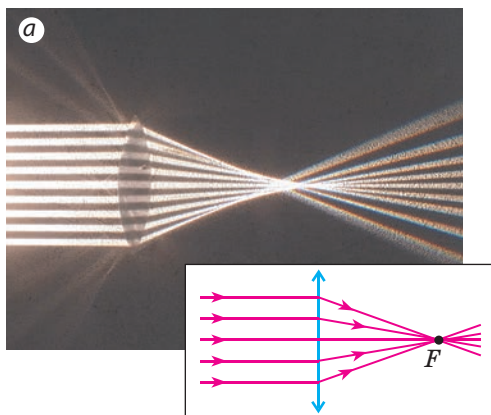
**Рис. 14.2.** Толщина вогнутой линзы посередине меньше, чем у краев: а — вид; б — разные вогнутые линзы в разрезе



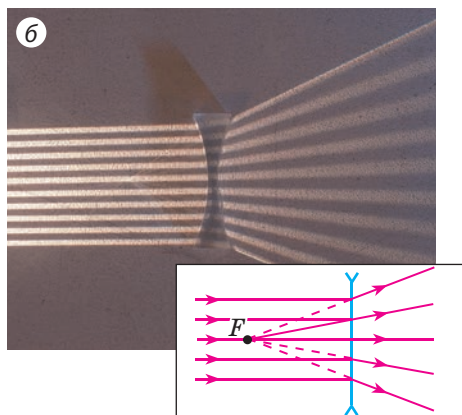
**Рис. 14.3.** Тонкая сферическая линза:  $O_1O_2$  — главная оптическая ось линзы;  $d$  — толщина линзы;  $R_1, R_2$  — радиусы сферических поверхностей, ограничивающих линзу;  $O$  — оптический центр линзы

\* Одна из поверхностей линзы может быть плоскостью, поскольку плоскость можно рассматривать как сферу бесконечного радиуса. Линзы также бывают *цилиндрическими*, но встречаются такие линзы редко.

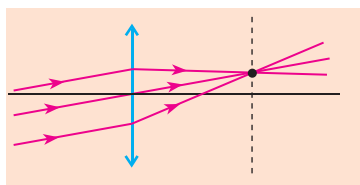




**Рис. 14.4.** Ход лучей после преломления в собирающей линзе. Точка  $F$  — действительный главный фокус линзы



**Рис. 14.5.** Ход лучей после преломления в рассеивающей линзе. Точка  $F$  — мнимый главный фокус линзы



**Рис. 14.6.** Ход параллельных лучей после преломления в собирающей линзе

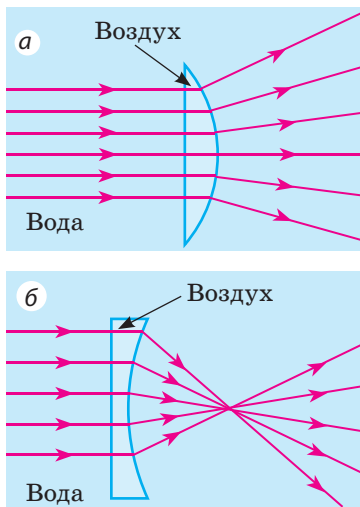
пересекаются преломленные лучи, — **действительный главный фокус линзы** (рис. 14.4).

Линза является **рассеивающей**, если лучи, параллельные ее главной оптической оси, пройдя сквозь линзу, идут расходящимся пучком. Точку  $F$ , в которой пересекаются продолжения преломленных лучей, называют **мнимым главным фокусом линзы** (рис. 14.5).

*Обратите внимание:* любой пучок **параллельных лучей**, даже если эти лучи не параллельны главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе всегда пересекаются в одной точке (рис. 14.6) (если линза рассеивающая, в одной точке пересекаются продолжения преломленных лучей).

Если оптическая плотность материала, из которого изготовлена линза, больше оптической плотности среды ( $n_{\text{л}} > n_{\text{ср}}$ ), то выпуклая линза будет собирать лучи (будет собирающей), а вогнутая линза будет рассеивать лучи (будет рассеивающей) (см. рис. 14.4, 14.5).

Если оптическая плотность материала, из которого изготовлена линза, меньше оптической плотности среды ( $n_{\text{л}} < n_{\text{ср}}$ ), то выпуклая линза будет рассеивающей (рис. 14.7, а), а вогнутая линза — собирающей (рис. 14.7, б).



**Рис. 14.7.** Выпуклая (а) и вогнутая (б) воздушные линзы в воде



Собирающей или рассеивающей будет выпуклая стеклянная линза в воздухе? выпуклая воздушная линза в стекле?

## 2 Даём определение оптической силы линзы

Любая линза имеет два главных фокуса\*, расположенных на одинаковом расстоянии от оптического центра линзы (см. [рис. 14.8](#)).

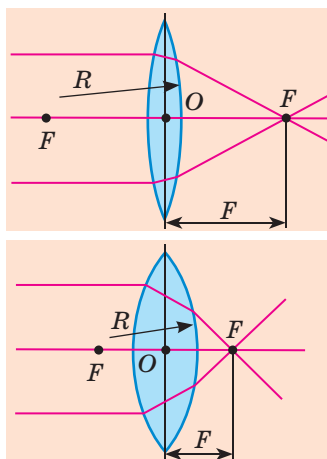
Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называют **фокусным расстоянием линзы**.

Фокусное расстояние, как и фокус, обозначают символом  $F$ . Единица фокусного расстояния в СИ — метр:

$$[F] = 1 \text{ м.}$$

Фокусное расстояние собирающей линзы договорились считать положительным, а рассеивающей — отрицательным. Очевидно, что чем сильнее преломляющие свойства линзы, тем меньше по модулю ее фокусное расстояние ([рис. 14.8](#)).

Физическую величину, которая характеризует линзу и является обратной фокусному расстоянию линзы, называют **оптической силой линзы**.



**Рис. 14.8.** Чем меньше радиусы  $R$  сферических поверхностей, ограничивающих линзу, тем сильнее эта линза преломляет свет, а значит, тем меньше ее фокусное расстояние  $F$

Оптическую силу линзы обозначают символом  $D$  и вычисляют по формуле:

$$D = \frac{1}{F}$$

Единица оптической силы — **диоптрия**:  $[D] = 1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

**1 диоптрия** — это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м. Оптическая сила собирающей линзы положительна, а рассеивающей линзы — отрицательна.



### Подводим итоги

Прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями, называют линзой. Линза является собирающей, если пучок параллельных лучей, падающий на нее, после преломления в линзе пересекается в одной точке (эта точка — действительный фокус линзы). Линза является рассеивающей, если параллельные лучи, падающие на нее, после преломления идут расходящимся пучком, а продолжения преломленных лучей пересекаются в одной точке (эта точка — мнимый фокус линзы).

Физическую величину, которая характеризует преломляющие свойства линзы и обратна ее фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы:  $D = \frac{1}{F}$ . Единица оптической силы линзы — диоптрия (1 дптр = 1 м<sup>-1</sup>).

\* Далее главный фокус линзы, как правило, будем называть *фокусом линзы*.



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение линзы.
2. Какие виды линз вам известны?
3. Чем рассеивающая линза отличается от собирающей?
4. Что называют действительным фокусом линзы?
5. Почему фокус рассеивающей линзы называют мнимым?
6. Что называют фокусным расстоянием линзы?
7. Дайте определение оптической силы линзы. В каких единицах ее измеряют?
8. Оптическая сила какой линзы принята за единицу?



### Упражнение № 14

1. Оптическая сила одной линзы  $-2$  дптр, а другой  $+2$  дптр. Чем отличаются эти линзы?
2. Фокусное расстояние одной линзы  $+0,5$  м, а другой  $+1$  м. Какая линза имеет большую оптическую силу?
3. Оптическая сила линзы равна  $-1,6$  дптр. Каково фокусное расстояние этой линзы? Какая это линза — собирающая или рассеивающая?
4. Две собирающие линзы изготовлены из одного сорта стекла. Как на ощупь определить, какая линза имеет большую оптическую силу?
5. На линзу направили параллельный пучок света (рис. 1). Какая это линза — собирающая или рассеивающая? Измерьте фокусное расстояние и выясните оптическую силу линзы.
6. Во льду есть полость в виде вогнутой линзы. Эта линза будет собирать или рассеивать свет? Поясните свой ответ.

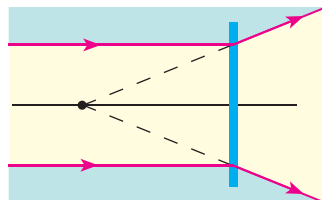


Рис. 1

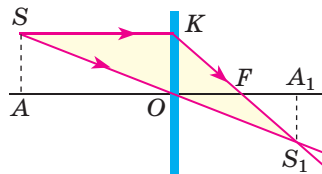


Рис. 2

7. Какие из изображенных на рис. 2 треугольников являются подобными? Определите длину отрезков  $S_1A_1$  и  $OF$ , если  $AO = 10$  см,  $SA = 2$  см,  $OA_1 = 6$  см.



### Экспериментальное задание

Предложите метод измерения фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы с помощью линейки. Проведите измерения.

*Подсказка:* лучи, идущие от удаленного предмета, параллельны.

### Физика и техника в Украине

**Институт физики НАНУ** (Киев) — ведущее научное учреждение по решению фундаментальных проблем экспериментальной и теоретической физики. Широко известны достижения ученых института в области физики твердого тела и жидких кристаллов, оптики, физической и квантовой электроники, ядерной энергетики, нанофизики и др.

С институтом связаны имена таких выдающихся ученых, как В. П. Линник, Г. В. Пфейффер, В. Е. Лашкарев, С. И. Пекарь, М. В. Пасечник, А. И. Лейпунский, Н. Д. Моргулис, Г. Д. Латышев, А. С. Давыдов, А. Ф. Прихотько, М. Т. Шпак и др.

На базе структурных подразделений Института физики в составе Академии наук были созданы Институт металлофизики, Институт полупроводников, Институт теоретической физики, Институт ядерных исследований, Институт прикладной оптики НАНУ. Сегодня в Институте физики работают выдающиеся ученые, академики НАНУ А. Г. Наумовец (физическая электроника) — вице-президент НАНУ, М. С. Бродин (нелинейная оптика) — почетный директор института, Л. П. Яценко (когерентная и квантовая оптика) — директор института с 2008 г.

## § 15. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗАХ. НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ

Основное свойство линз заключается в том, что линзы дают изображение точки, а соответственно, и предмета (как совокупности точек) (рис. 15.1). В зависимости от расстояния между предметом и линзой изображение предмета может быть больше или меньше, чем сам предмет, мнимым или действительным. Выясним, при каких условиях с помощью линзы образуются те или иные изображения, и рассмотрим приемы их построения.

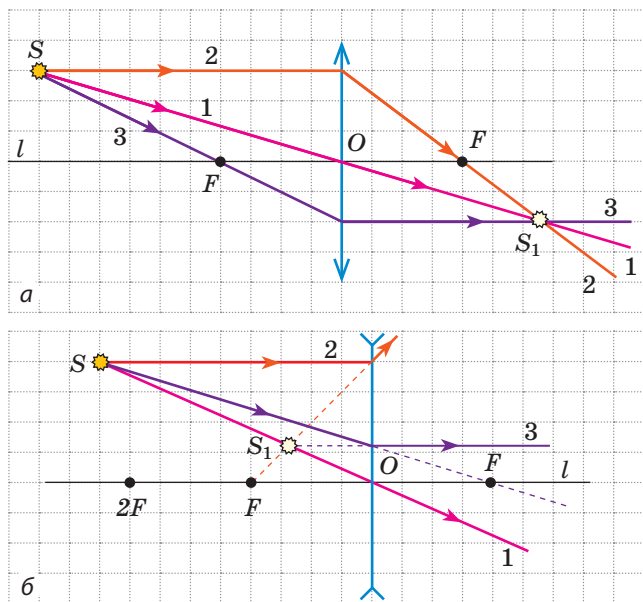


**Рис. 15.1.** Получение изображения пламени свечи с помощью собирающей линзы

### 1 Ищем «удобные лучи»

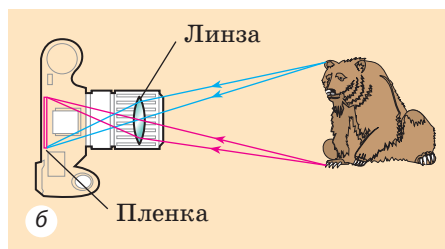
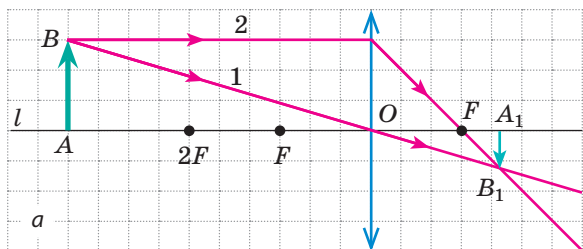
Любой предмет можно представить как совокупность точек. Каждая точка предмета излучает (или отражает) свет во всех направлениях. В создании изображения участвует множество лучей, однако для построения изображения некоторой точки  $S$  достаточно найти точку пересечения любых двух лучей, выходящих из точки  $S$  и проходящих через линзу. Обычно для этого выбирают два из трех «удобных лучей» (рис. 15.2).

Точка  $S_1$  будет **действительным изображением** точки  $S$ , если в точке  $S_1$  пересекаются *сами* преломленные лучи (рис. 15.2, а). Точка  $S_1$  будет **мнимым изображением** точки  $S$ , если в точке  $S_1$  пересекаются *продолжения* преломленных лучей (рис. 15.2, б).



**Рис. 15.2.** Три самых простых в построении луча («удобные лучи»):

1 — луч, проходящий через оптический центр  $O$  линзы, не преломляется и не изменяет своего направления;  
2 — луч, параллельный главной оптической оси  $l$  линзы, после преломления в линзе идет через фокус  $F$  (а) или через фокус  $F$  идет его продолжение (б);  
3 — луч, проходящий через фокус  $F$ , после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси  $l$  линзы (а, б)



**Рис. 15.3.** а — построение изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  в собирающей линзе: предмет  $AB$  расположен за двойным фокусом линзы; б — ход лучей в фотоаппарате

## 2 Строим изображение предмета, которое даёт линза

Рассмотрим все возможные случаи расположения предмета  $AB$  относительно собирающей линзы и докажем, что размеры и вид изображения зависят от расстояния между предметом и линзой.

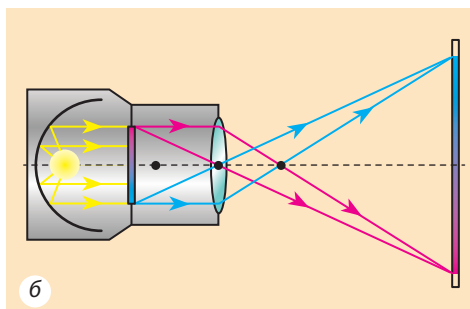
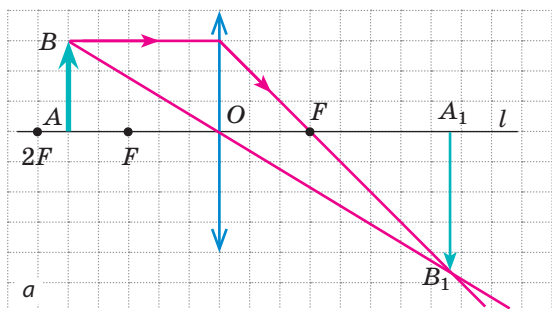
1. Предмет расположен за двойным фокусом собирающей линзы (рис. 15.3, а). Сначала построим изображение точки  $B$ . Для этого воспользуемся двумя лучами — 1 и 2. После преломления в линзе они пересекутся в точке  $B_1$ . Значит, точка  $B_1$  является действительным изображением точки  $B$ . Для построения изображения точки  $A$  опустим из точки  $B_1$  перпендикуляр на главную оптическую ось  $l$ . Точка  $A_1$  пересечения перпендикуляра и оси  $l$  является изображением точки  $A$ .

Итак,  $A_1B_1$  — изображение предмета  $AB$ . Это *изображение действительное, уменьшенное, перевернутое*. Такое изображение получается, например, на сетчатке глаза или пленке фотоаппарата (рис. 15.3, б).

2. Предмет расположен между фокусом и двойным фокусом собирающей линзы (рис. 15.4, а). Изображение предмета *действительное, увеличенное, перевернутое*. Такое изображение позволяет получить на экране проекционная аппаратура (рис. 15.4, б).

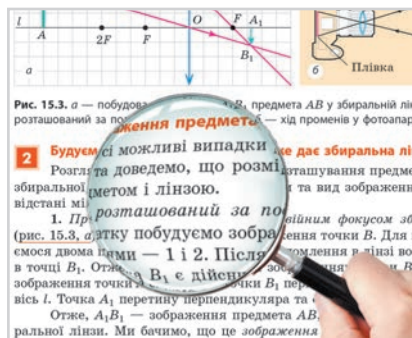
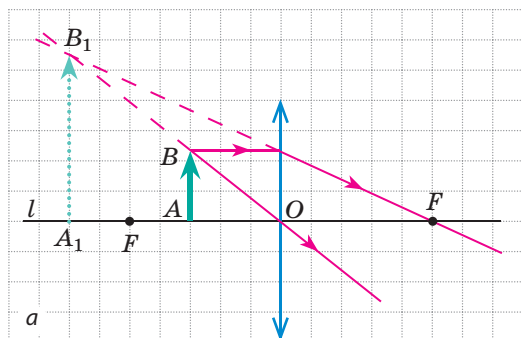
3. Предмет расположен между фокусом и собирающей линзой (рис. 15.5, а). Лучи, вышедшие из точки  $B$ , после преломления в линзе идут расходящимся пучком. Однако их продолжения пересекаются в точке  $B_1$ .

В данном случае изображение предмета является *мнимым, увеличенным, прямым*. Изображение расположено по ту же сторону от линзы, что



**Рис. 15.4.** а — построение изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  в собирающей линзе: предмет  $AB$  расположен между фокусом и двойным фокусом линзы; б — ход лучей в проекционном аппарате

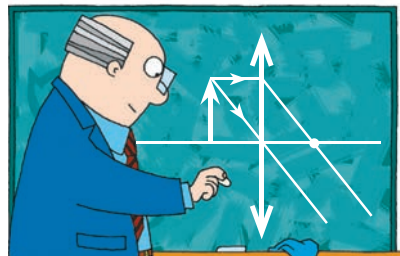




**Рис. 15.5.** а — построение изображения  $A_1B_1$  предмета  $AB$  в собирающей линзе: предмет  $AB$  расположен между линзой и ее фокусом; б — с помощью лупы можно получить увеличенное изображение текста (или предмета) и рассмотреть его детальнее

и предмет, поэтому мы не можем увидеть изображение предмета на экране, но видим его, когда смотрим на предмет через линзу. Именно такое изображение дает короткофокусная собирающая линза — лупа (рис. 15.5, б).

4. *Предмет расположен на фокусном расстоянии от собирающей линзы.* После преломления все лучи идут параллельным пучком (рис. 15.6), следовательно, в данном случае ни действительного, ни мнимого изображения мы не получим.

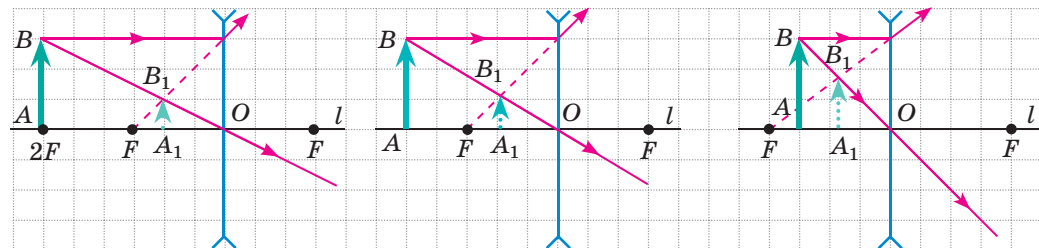


**Рис. 15.6.** Если предмет расположен в фокусе собирающей линзы, мы не получим его изображения

**?** Каким будет изображение предмета, если предмет расположить в двойном фокусе линзы? Постройте это изображение и подтвердите или опровергните свое предположение.

Внимательно рассмотрите рис. 15.7, на котором показано построение изображений предмета, полученных с помощью рассеивающей линзы. Видим, что *рассеивающая линза всегда дает мнимое, уменьшенное, прямое изображение, расположенное по ту же сторону от линзы, что и сам предмет.*

**?** Выясните, получим ли мы изображение, если расположим предмет в фокусе рассеивающей линзы.



**Рис. 15.7.** Рассеивающая линза всегда дает мнимое, уменьшенное, прямое изображение

Чаще всего предмет больше, чем линза, или часть линзы закрыта непрозрачным экраном (как, например, линза в объективе фотоаппарата). Изменяется ли при этом внешний вид изображения? Конечно же нет. Ведь от каждой точки предмета на линзу падает множество лучей, и все они собираются в соответствующей точке изображения. Если закрыть часть линзы, это приведет лишь к тому, что энергия, попадающая в каждую точку изображения, уменьшится. Изображение будет менее ярким, однако ни его вид, ни месторасположение не изменятся. Именно поэтому, строя изображение, мы можем использовать все «удобные лучи», даже те, которые не проходят через линзу (рис. 15.8).

### 3 Получаем формулу тонкой линзы

Построим изображение предмета в собирающей линзе (рис. 15.9).

Рассмотрим прямоугольные треугольники  $FOC$  и  $FA_1B_1$ . Эти треугольники подобны ( $\triangle FOC \sim \triangle FA_1B_1$ ), поэтому  $\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FA_1}$ , или  $\frac{h}{H} = \frac{f}{f - F}$  (1).

$$\triangle BAO \sim \triangle B_1A_1O, \text{ поэтому } \frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}, \text{ или } \frac{h}{H} = \frac{d}{f} \quad (2).$$

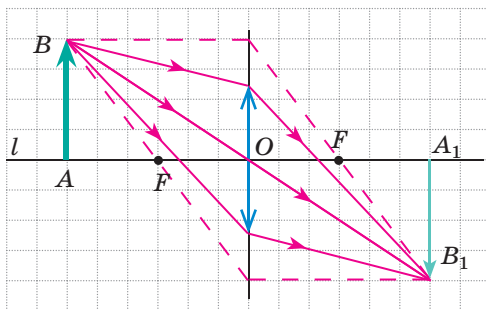
Приравняв правые части равенств (1) и (2), имеем  $\frac{f}{f - F} = \frac{d}{f}$ , то есть  $Ff = df - dF$ , или  $df = Ff + dF$ . Разделив обе части последнего равенства на  $f d F$ , получим **формулу тонкой линзы**:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \text{ или } D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

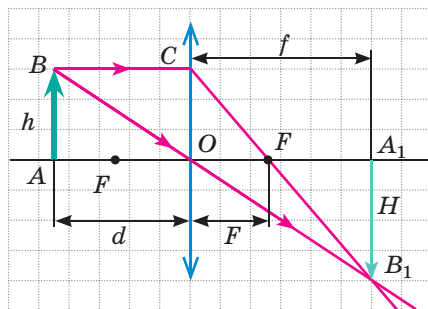
где  $D = \frac{1}{F}$  — оптическая сила линзы.

При решении задач следует иметь в виду:

- расстояние  $f$  (от линзы до изображения) следует брать со знаком «-», если изображение мнимое, и со знаком «+», если изображение действительное;
- фокусное расстояние  $F$  собирающей линзы является положительным, рассеивающей линзы — отрицательным;
- увеличение  $\Gamma$  линзы определяют по формуле:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$ .



**Рис. 15.8.** Построение изображения предмета в случае, когда предмет значительно больше линзы



**Рис. 15.9.** К выведению формулы тонкой линзы:  $h$  — высота предмета;  $H$  — высота изображения;  $d$  — расстояние от предмета до линзы;  $f$  — расстояние от линзы до изображения;  $F$  — фокусное расстояние

## 4

## Учимся решать задачи

**Задача.** Рассматривая монету с помощью лупы, оптическая сила которой +10 дптр, мальчик расположил монету на расстоянии 6 см от лупы. Определите: 1) фокусное расстояние линзы; 2) на каком расстоянии от лупы находится изображение монеты; 3) какое изображение дает лупа — действительное или мнимое; 4) какое увеличение дает лупа.

*Анализ физической проблемы.* Лупу можно считать тонкой линзой, поэтому воспользуемся формулой тонкой линзы. Фокусное расстояние найдем, воспользовавшись определением оптической силы линзы.

Дано:

$d = 6 \text{ см} = 0,06 \text{ м}$   
 $D = +10 \text{ дптр}$

Найти:

$F$  — ?

$f$  — ?

$\Gamma$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

По определению  $D = \frac{1}{F} \Rightarrow F = \frac{1}{D}$ .

По формуле тонкой линзы:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d}$ ,  
 или  $\frac{1}{f} = \frac{d - F}{Fd}$ . Следовательно,  $f = \frac{Fd}{d - F}$ .

Зная расстояние  $f$ , определим увеличение:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$ .

Найдем значения искомых величин:

$$F = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ (м)}; f = \frac{0,1 \cdot 0,06}{0,06 - 0,1} = -0,15 \text{ (м)}; \Gamma = \frac{0,15}{0,06} = \frac{15}{6} = \frac{5}{2} = 2,5.$$

Знак «-» перед значением  $f$  говорит о том, что изображение мнимое.

**Ответ:**  $F = 10 \text{ см}$ ;  $f = -15 \text{ см}$ ; изображение мнимое;  $\Gamma = 2,5$ .



## Подводим итоги

В зависимости от типа линзы (собирающая или рассеивающая) и месторасположения предмета относительно данной линзы получают разные изображения предмета:

Расположение предмета	Характеристика изображения в линзе	
	собирающей	рассеивающей
За двойным фокусом линзы ( $d > 2F$ )	действительное, уменьшенное, перевернутое	мнимое, уменьшенное, прямое
В двойном фокусе линзы ( $d = 2F$ )	действительное, равное, перевернутое	
Между фокусом и двойным фокусом линзы ( $F < d < 2F$ )	действительное, увеличенное, перевернутое	
В фокусе линзы ( $d = F$ )	изображения нет	
Между линзой и фокусом ( $d < F$ )	мнимое, увеличенное, прямое	

Расстояние  $d$  от предмета до линзы, расстояние  $f$  от линзы до изображения и фокусное расстояние  $F$  связаны формулой тонкой линзы:  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .



## Контрольные вопросы

1. Какие лучи удобно использовать для построения изображений, получаемых с помощью линз?
2. Можно ли получить действительное изображение с помощью рассеивающей линзы? мнимое изображение — с помощью собирающей линзы?
3. В каком случае изображение предмета можно увидеть на экране — когда это изображение действительное или когда оно мнимое?
4. Как по виду изображения определить, собирающей или рассеивающей является линза?
5. Назовите оптические устройства, в которых есть линзы.
6. Какие физические величины связывает формула тонкой линзы? Какие правила следует соблюдать, применяя эту формулу?



## Упражнение № 15

1. Перенесите рис. 1, а, б в тетрадь и для каждого случая постройте изображение предмета  $AB$  в собирающей линзе. Охарактеризуйте изображения.

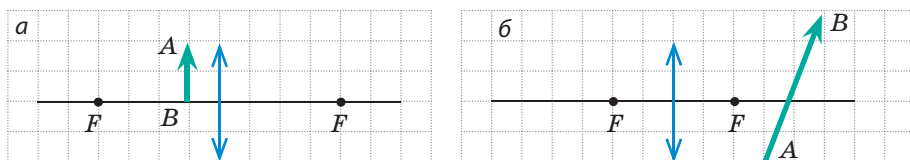


Рис. 1

2. Оптическая сила линзы  $+5$  дптр. На каком расстоянии от линзы нужно расположить зажженную свечу, чтобы получить изображение пламени свечи в натуральную величину?
3. Предмет расположен на расстоянии 1 м от линзы. Мнимое изображение предмета расположено на расстоянии 25 см от линзы. Определите оптическую силу линзы. Какая это линза — собирающая или рассеивающая?
4. На лист бумаги с печатным текстом попала капля прозрачного клея. Почему буквы, оказавшиеся под каплей клея, кажутся больше соседних?
5. С помощью линзы получили четкое изображение предмета на экране. Определите: 1) оптическую силу линзы, если предмет расположен на расстоянии 60 см от линзы, а расстояние между предметом и экраном — 90 см; 2) высоту предмета, если высота его изображения 5 см.
6. Перенесите рис. 2, а–в в тетрадь и для каждого случая определите расположение оптического центра и фокусов линзы, тип линзы, вид изображения ( $KN$  — оптическая ось;  $S$  — светящаяся точка;  $S_1$  — изображение точки  $S$ ).

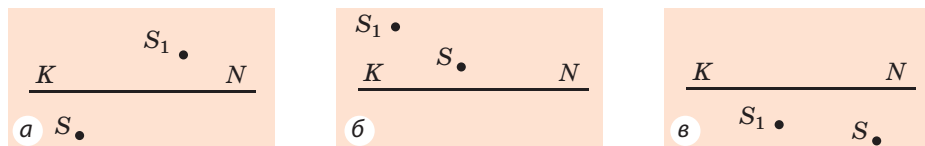


Рис. 2

7. Определите оптическую силу лупы, которая дает увеличенное в 6 раз изображение, расположенное на расстоянии 20 см от лупы.
8. Как изменяется и в каком направлении движется изображение предмета, если предмет движется от бесконечности к линзе?
9. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте об истории фотоаппарата. Сделайте компьютерную презентацию.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5



**Тема.** Определение фокусного расстояния и оптической силы тонкой линзы.

**Цель:** определить фокусное расстояние и оптическую силу тонкой собирающей линзы.

**Оборудование:** собирающая линза на подставке, экран, источник света (свеча или электрическая лампа), измерительная лента.

### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ



#### Подготовка к эксперименту

1. Перед выполнением работы вспомните: 1) требования безопасности при работе со стеклянными и огнеопасными предметами; 2) формулу тонкой линзы; 3) определение оптической силы линзы.
2. Проанализируйте формулу тонкой линзы. Какие измерения вам следует выполнить, чтобы определить фокусное расстояние линзы?



#### Эксперимент

*Строго соблюдайте инструкцию по безопасности (см. форзац учебника). Результаты измерений сразу заносите в таблицу.*

1. Расположив линзу между источником света и экраном, получите на экране четкое уменьшенное изображение источника света. Измерьте расстояние  $d$  от источника света до линзы и расстояние  $f$  от линзы до экрана.
2. Перемещая линзу, получите на экране четкое увеличенное изображение источника света. Измерьте расстояние  $d$  от источника света до линзы и расстояние  $f$  от линзы до экрана.



#### Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого опыта определите: 1) фокусное расстояние линзы (воспользовавшись формулой тонкой линзы); 2) оптическую силу линзы (воспользовавшись определением оптической силы линзы).
2. Закончите заполнение таблицы.

Номер опыта	Расстояние от предмета до линзы $d$ , м	Расстояние от линзы до экрана $f$ , м	Фокусное расстояние линзы $F$ , м	Оптическая сила линзы $D$ , дптр
1				
2				



#### Анализ эксперимента и его результатов

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором: 1) сравните значения фокусного расстояния, полученные вами в разных опытах; 2) узнайте у учителя значение оптической силы линзы, приведенное в паспорте, и сравните его со значениями оптической силы линзы, полученными в ходе эксперимента; 3) укажите причины возможного расхождения результатов.



### + Творческое задание

Определите фокусное расстояние линзы еще двумя методами: 1) получив изображение удаленного предмета (например, дерева за окном); 2) получив изображение источника света, по размеру равное самому источнику. Какие измерения и расчеты вы выполняли в каждом случае?

### \* Задание «со звездочкой»

Оцените относительную погрешность одного из экспериментов, воспользовавшись формулой  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{D_{\text{изм}}}{D_{\text{пасп}}} \right| \cdot 100\%$ , где  $D_{\text{изм}}$  — значение оптической силы линзы, полученное во время эксперимента;  $D_{\text{пасп}}$  — значение оптической силы линзы, указанное в паспорте.

## § 16. ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ДЕФЕКТЫ ЗРЕНИЯ И ИХ КОРРЕКЦИЯ

Орган зрения человека — глаз — одно из самых совершенных и в то же время самых простых оптических устройств. Как устроен глаз? Почему некоторые люди плохо видят и как скорректировать их зрение? С какими особенностями зрения связано производство мультипликационных фильмов? Об этом вы узнаете из данного параграфа.

### 1 Вспоминаем строение глаза

Глаз человека — это *оптическая система*, состоящая из нескольких оптических элементов, которые в совокупности предназначены для создания изображения.

Глаз (см. [рис. 16.1](#)) имеет форму шара диаметром примерно 2,5 см. Снаружи глаз покрыт плотной непрозрачной оболочкой — **склерой**. Передняя часть склеры переходит в прозрачную *роговую оболочку* — **роговицу**, которая действует как собирающая линза и вместе с **глазной жидкостью** обеспечивает 75 % способности глаза преломлять свет. Изнутри склера покрыта *сосудистой оболочкой*, которая в передней части глаза переходит в *радужную оболочку* — **радужку**. В центре радужки расположено круглое отверстие — **зрачок**. Зрачок сужается при увеличении освещенности и расширяется при ее ослаблении.

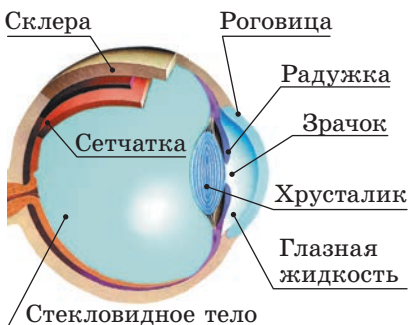


Рис. 16.1. Строение глаза

Способность глаза приспосабливаться к изменению освещенности называют **адаптацией**.

За зрачком расположен **хрусталик** — собирающая линза, которая благодаря скрепленным с ней мышцам может изменять свою кривизну, а значит, оптическую силу.

В создании изображения принимает участие и **стекловидное тело** — прозрачная студенистая масса, заполняющая пространство между хрусталиком и сетчаткой.

Свет, попадающий в глаз, преломляется в роговице, глазной жидкости, хрусталике и стекловидном теле. В результате на сетчатке образуется *действительное, уменьшенное, перевернутое изображение* предмета (рис. 16.2).

## 2 Выясняем, почему человек видит как отдаленные предметы, так и расположенные рядом

Если у человека хорошее зрение, он видит четкими как далеко, так и близко расположенные предметы. Такое возможно потому, что при изменении расстояния до предмета хрусталик изменяет свою кривизну, то есть изменяет свою оптическую силу.

Способность хрусталика изменять свою кривизну при изменении расстояния до рассматриваемого предмета называют **аккомодацией**.

Если человек смотрит на удаленные предметы, то лучи, исходящие от этих предметов и попадающие в глаз, практически параллельны. В этом случае глаз наиболее расслаблен (вспомните: задумавшись, мы смотрим как будто вдаль). Чем ближе расположен предмет, тем сильнее напрягается глаз (мышцы глаза увеличивают кривизну хрусталика).

Наименьшее расстояние, на котором глаз видит предмет практически не утомляясь, называют **расстоянием наилучшего зрения**.

Для человека с нормальным зрением расстояние наилучшего зрения — примерно 25 см (именно на таком расстоянии он держит книгу при чтении).

## 3 Узнаём об инерции зрения

Если мы будем быстро перемещать в темноте бенгальский огонь, то увидим светящиеся фигуры, образованные «огненным контуром». Во время быстрого вращения карусели ее разноцветные лампы, сливаясь, выглядят для нас как кольца. Наши глаза все время мигают, при этом мы не замечаем, что на некоторый интервал времени предмет, на который мы смотрим, становится невидимым.

Описанные явления объясняются **инерцией зрения**. Дело в том, что, после того как изображение предмета исчезает с сетчатки глаза (предмет перемещают, прекращают освещать, заслоняют непрозрачным экраном и т. п.), зрительный образ, вызванный этим предметом, сохраняется в течение 0,1 с.

Инерцию зрения широко используют в анимационном кино. Картинки на экране сменяются очень быстро (24 раза в секунду), и во время их смены экран не освещается, однако зритель этого не замечает, — он просто видит

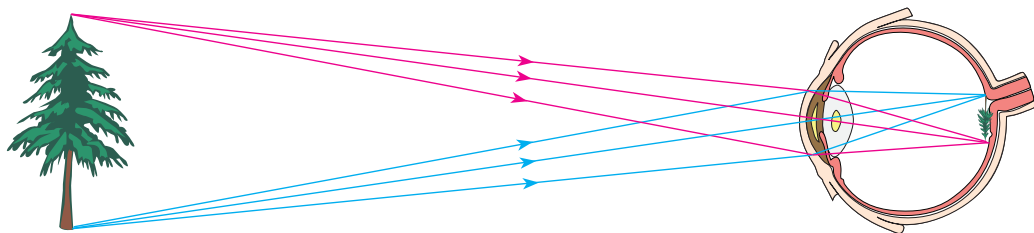
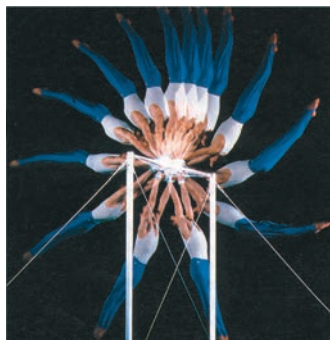


Рис. 16.2. Изображение на сетчатке глаза — действительное, уменьшенное, перевернутое



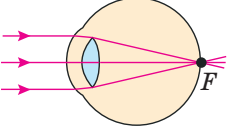
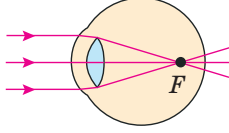
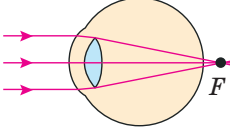
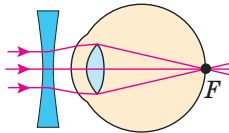
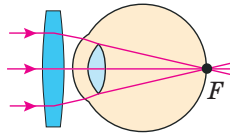
**Рис. 16.3.** Стробоскопическая фотография гимнаста

ряд чередующихся картинок. Так на экране создается иллюзия движения.

**?** Сколько картинок нужно нарисовать художнику, чтобы получить мультипликационный фильм продолжительностью всего 10 мин?

На инерции зрения также основано применение стробоскопа. (Стробоскоп представляет собой источник света, излучающий световые вспышки через малые равные интервалы времени.) При фотографировании объектов, освещенных стробоскопом, получают стробоскопические фотографии (рис. 16.3).

#### 4 Узнаём о недостатках зрения и их коррекции

Нормальное зрение	Недостатки зрения	
	Близорукость	Дальнозоркость
<p>Фокус <math>F</math> оптической системы глаза в спокойном состоянии расположен на сетчатке.</p>  <p>На сетчатке создается четкое изображение отдаленных предметов</p>	<p>Фокус <math>F</math> оптической системы глаза в спокойном состоянии расположен перед сетчаткой.</p>  <p>На сетчатке создается размытое изображение отдаленных предметов.</p>	<p>Фокус <math>F</math> оптической системы глаза в спокойном состоянии расположен за сетчаткой.</p>  <p>На сетчатке создается размытое изображение отдаленных предметов.</p>
<p>Расстояние наилучшего зрения — примерно 25 см. На таком расстоянии человек с нормальным зрением читает книгу.</p>	<p>Расстояние наилучшего зрения менее 25 см. Близорукий человек читает книгу, приближая ее к глазам.</p>	<p>Расстояние наилучшего зрения более 25 см. Дальнозоркий человек читает книгу, отдаляя ее от глаз.</p>
<p>Фокусное расстояние нормального глаза равно приблизительно 1,71 см.</p> <p><b>?</b> Определите оптическую силу оптической системы «нормальный глаз».</p>	<p>Корректируется ношением очков с рассеивающими линзами.</p> 	<p>Корректируется ношением очков с собирающими линзами.</p> 



#### Подводим итоги

С точки зрения физики глаз — оптическая система, основные элементы которой — роговица, глазная жидкость, хрусталик, стекловидное тело. Свет преломляется в этой оптической системе, и в результате на сетчатке образуется уменьшенное, действительное, перевернутое изображение предмета.

После того как изображение предмета исчезает с сетчатки глаза, зрительный образ, вызванный этим предметом, хранится в сознании человека в течение 0,1 с. Это свойство называют инерцией зрения.



### Контрольные вопросы

1. Назовите оптические элементы глаза и их функции.
2. Как реагирует зрачок на изменение освещенности?
3. Почему человек с нормальным зрением может одинаково четко видеть как далеко, так и близко расположенные предметы?
4. Что такое инерция зрения? Приведите примеры.
5. Какой недостаток зрения называют близорукостью? дальнозоркостью? Как их можно скорректировать?



### Упражнение № 16

1. Оптическая сила линз бабушкиных очков  $-2,5$  дптр. Определите фокусное расстояние этих линз. Какой недостаток зрения у бабушки?
2. На каком минимальном расстоянии от глаза человек с нормальным зрением должен держать зеркальце, чтобы, не утомляясь, видеть четкое изображение глаза?
3. Почему, чтобы лучше видеть, близорукий человек щурится?
4. Почему даже в чистой воде человек без маски плохо видит?
5. Мальчик держит книгу на расстоянии 20 см от глаз. Определите оптическую силу линз, необходимых мальчику, чтобы читать книгу на расстоянии наилучшего зрения для нормального глаза.
6. Проведите аналогию между фотоаппаратом и глазом человека. Какие функции глаза выполняют разные части фотоаппарата? При необходимости обратитесь к дополнительным источникам информации.
7. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о методах профилактики дефектов зрения. Как можно исправить зрение?



### Экспериментальное задание

Возьмите разные очки и предложите несколько способов, с помощью которых можно определить, какой недостаток зрения (близорукость или дальнозоркость) корректирует каждая пара. Проверьте, «работают» ли эти способы.

## Физика и техника в Украине



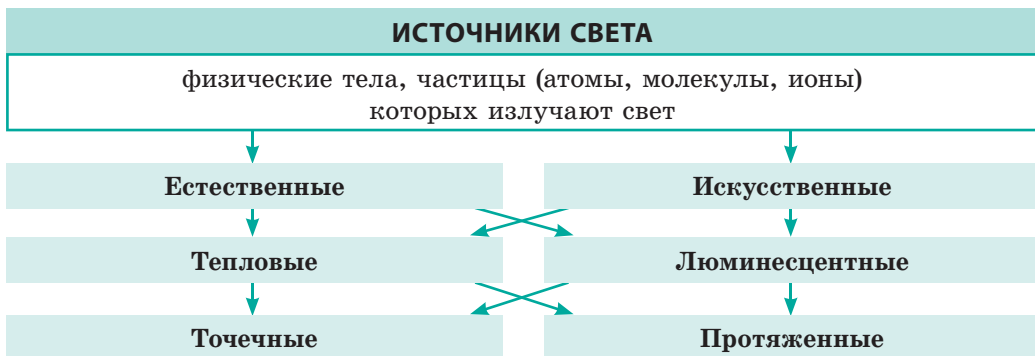
**Александр Теодорович Смакула** (1900–1983) — выдающийся украинский физик и изобретатель. Используя понятие квантовых осцилляторов, А. Т. Смакула смог объяснить радиационную окраску кристаллов и вывести количественное математическое соотношение, известное в науке как «формула Смакулы». Работы ученого создали предпосылки для синтеза витаминов А, В<sub>2</sub> и др., а процесс трансформации кристаллического углерода называют теперь «инверсией Смакулы».

В 1935 г. А. Т. Смакула сделал открытие, благодаря которому его имя навсегда останется в истории мировой науки, — способ улучшения оптических устройств («просветление оптики»). Суть открытия в том, что поверхность линзы покрывают слоем специального материала толщиной  $1/4$  длины падающей волны (десятичные доли микрометра), что значительно уменьшает отражение света от поверхности линзы и в то же время увеличивает контрастность изображения. Данное открытие получило очень широкое применение, ведь линзы являются основным элементом большинства оптических устройств (фотоаппаратов, биноклей, микроскопов и т. д.).

2000 год был объявлен ЮНЕСКО годом А. Т. Смакулы.

## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА II «Световые явления»

- Изучив раздел II, вы узнали, что мы видим окружающий мир благодаря тому, что *тела вокруг нас отражают свет или сами являются источниками света.*



- Вы узнали о *законах геометрической оптики.*



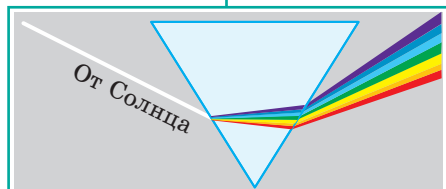


3. Вы ознакомились с опытами И. Ньютона и выяснили, что белый свет состоит из света разных цветов. Свет разных цветов распространяется в вакууме с одинаковой скоростью ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), а в среде — с разной.

### ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

зависимость показателя преломления среды от цвета света

#### Опыты И. Ньютона



#### Спектральные цвета

Красный Оранжевый Желтый  
Зеленый Голубой Синий Фиолетовый

Наибольший показатель преломления имеет фиолетовый свет, наименьший — красный

4. Вы научились строить изображения в плоском зеркале и линзах.

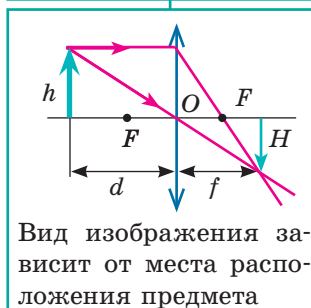
### ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

#### Плоское зеркало

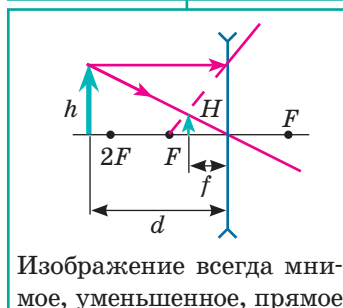


#### Линза

##### собирающая



##### рассеивающая



Оптическая сила линзы:  $D = \frac{1}{F}$ .

Формула тонкой линзы:  $D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ .

Увеличение предмета в линзе:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$ .

5. Вы ознакомились с оптическими устройствами, в которых используют линзы.

### ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

#### Устройства, вооружающие глаз

Лупа

Очки

#### Устройства, дающие изображение на экране

Фотоаппарат

Проекторный аппарат

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ II «Световые явления»

Задания 1–8 содержат только один правильный ответ.

1. (1 балл) Какое оптическое явление иллюстрирует фотография (рис. 1)?

а) отражение света;  
б) поглощение света;  
в) дисперсию света;  
г) преломление света.



Рис. 1

2. (1 балл) Какой закон подтверждается существованием солнечных и лунных затмений?  
а) закон отражения света;  
б) закон прямолинейного распространения света;  
в) закон сохранения энергии;  
г) закон преломления света.

3. (1 балл) Каким является изображение предмета в плоском зеркале?

а) увеличенным действительным;                      в) уменьшенным мнимым;  
б) равным действительным;                              г) равным мнимым.

4. (1 балл) Луч света падает из воздуха на поверхность стеклянной пластины (рис. 2). На каком рисунке правильно указаны все три угла: угол падения  $\alpha$ , угол отражения  $\beta$  и угол преломления  $\gamma$ ?

а) 1;  
б) 2;  
в) 3;  
г) 4.

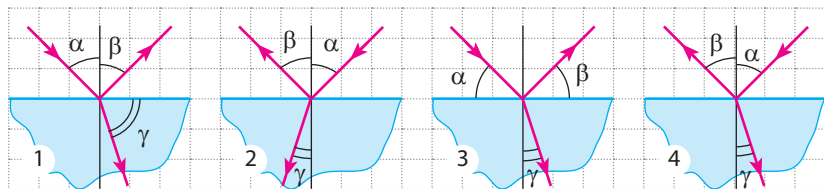


Рис. 2

5. (2 балла) Какая точка (рис. 3) является изображением светящейся точки  $S$  в плоском зеркале?

а) 1;                      б) 2;                      в) 3;  
г) изображения точки  $S$  в зеркале нет.

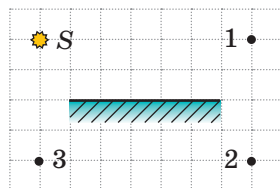


Рис. 3

6. (2 балла) Какова оптическая сила линзы, ход лучей в которой показан на рис. 4?

а)  $-0,04$  дптр;                      в)  $+25$  дптр;  
б)  $+4$  дптр;                      г)  $+50$  дптр.

7. (2 балла) Какое у человека нарушение зрения, если он носит очки, нижняя часть которых — выпуклые стекла, а верхняя часть — плоские?

а) дальнозоркость;  
б) близорукость;  
в) у человека нет нарушений зрения;  
г) определить невозможно.

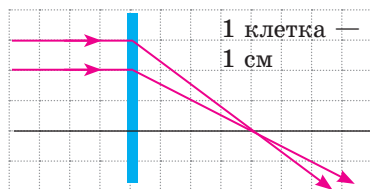


Рис. 4

8. (2 балла) Во время фотографирования на объектив фотоаппарата села муха. Повлияет ли это на снимок, и если повлияет, то как?  
 а) не повлияет;  
 б) на снимке будет изображение мухи;  
 в) снимок будет менее ярким;  
 г) снимок будет более ярким.
9. (3 балла) Человек приближается к зеркалу со скоростью 2 м/с. С какой скоростью к человеку приближается его отражение в зеркале?
10. (3 балла) Угол падения луча на зеркальную поверхность равен  $70^\circ$ . Чему равен угол между отраженным лучом и зеркальной поверхностью?
11. (3 балла) Свет падает из воздуха на поверхность прозрачного вещества под углом  $45^\circ$ . Определите абсолютный показатель преломления данного вещества, если преломленный пучок света распространяется под углом  $60^\circ$  к границе раздела сред.
12. (3 балла) Предмет расположен на расстоянии 1 м от собирающей линзы с фокусным расстоянием 0,5 м. На каком расстоянии от линзы расположено изображение предмета?
13. (3 балла) Установите соответствие между средой и скоростью распространения света в этой среде.
- |          |                         |
|----------|-------------------------|
| 1 Алмаз  | А $1,24 \cdot 10^8$ м/с |
| 2 Бензин | Б $1,76 \cdot 10^8$ м/с |
| 3 Лед    | В $2,00 \cdot 10^8$ м/с |
|          | Г $2,29 \cdot 10^8$ м/с |
14. (4 балла) На рис. 5 показаны главная оптическая ось  $KM$  линзы, предмет  $AB$  и его изображение  $A_1B_1$ . Определите тип линзы, ее фокусное расстояние и оптическую силу.
15. (4 балла) Почему кривизна хрусталика глаза рыбы (рис. 6) больше, чем у человека?
16. (4 балла) Рассматривая марку с помощью лупы, мальчик видит ее на расстоянии наилучшего зрения увеличенной в 4 раза. На каком расстоянии от глаз мальчик держит лупу, если у него нормальное зрение, а оптическая сила лупы +15 дптр?



Рис. 5



Рис. 6

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, и подсчитайте сумму баллов. Затем эту сумму разделите на три. Полученный результат будет соответствовать уровню ваших учебных достижений.



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

## Новые приемники и источники света

Благодаря достижениям в электронике существенным образом изменились как источники, так и приемники света, стали общедоступными уникальные научные изобретения.

Расспросите ваших дедушек и бабушек о том, как делали фотографии двадцать и более лет тому назад. Оказывается, это была достаточно сложная процедура. Для вас же стало обычным, увидев интересный сюжет, навести камеру мобильного телефона, нажать соответствующую кнопку и мгновенно переслать готовое изображение друзьям.

Приведем еще пример. Об узком направленном пучке света, имеющем уникальные свойства, раньше шла речь только в фантастических произведениях. В наше время лазерный луч применяется настолько широко, что даже самые смелые фантасты прошлого века не могли себе этого представить. Так что, получается, раздел физики под названием «Оптика» безнадежно устарел и вы зря изучали раздел II учебника?

Не будем делать поспешных выводов и рассмотрим некоторые из современных оптических устройств подробнее.

### Лазер

Все вы, конечно, видели лазерные шоу в цирке или на эстрадных концертах: тонкие пучки света пронизывают пространство зала, быстро пролетают над головами зрителей. Захватывающее зрелище!

На рисунке представлен один из видов лазеров — газовый. Яркий светящийся «шнур» в стеклянной трубке — это не лазерный луч, а электрический разряд, подобный разряду в лампах дневного света.

Разряд служит для «накачки» рабочего тела (газа внутри стеклянной трубки). Этот процесс заключается в том, что атомы газа постепенно приобретают избыточную энергию от электрического разряда, а затем лавинообразно отдают ее в виде импульса (вспышки) света.

По названию вещества рабочего тела стали классифицировать и сами лазеры: газовые, жидкостные и наиболее удобные для бытовых целей — твердотельные лазеры.

Эстрадные шоу — далеко не единственное применение лазеров. Данные устройства широко используют в медицине, военном деле и др.



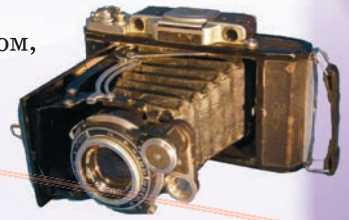
Газовый лазер (laser — первые буквы англ. *light amplification by stimulated emission of radiation* — усиление света с помощью вынужденного излучения)



## Цифровой фотоаппарат

В фотоаппаратах старых конструкций устройством, фиксирующим изображение, была фотопленка. В цифровых фотоаппаратах таким устройством является пластинка, покрытая очень мелкими световыми датчиками (пикселями). Каждый из этих датчиков фиксирует «кусочек» светового потока. Чем меньше размер пикселя, тем более качественное изображение можно получить. Пластинка хорошего фотоаппарата насчитывает 18–20 млн пикселей. Количество пикселей в мобильном телефоне меньше, так как съемка — не основная функция телефона, соответственно и качество снимков хуже.

Микропроцессор фотоаппарата обрабатывает информацию от сенсоров и запоминает ее в виде отдельного файла.



История фотографии насчитывает более 180 лет. При этом и в старых фотоаппаратах, и в самых современных один из важнейших элементов — оптическая система, которая должна обеспечить четкое изображение разных объектов съемки — и вашего приятеля, стоящего совсем рядом, и гор, виднеющихся на горизонте. Так что рано сбрасывать оптику со счетов, конструкторам современных фотоаппаратов и видеокамер она еще наверняка пригодится!

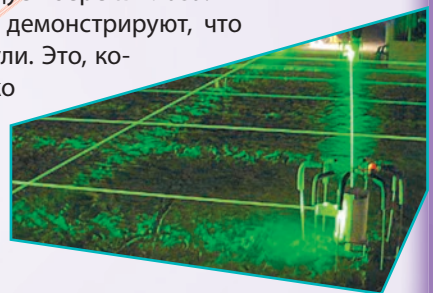
## Это интересно

Очень часто создатели современных фильмов сознательно (или из-за недостатка знаний) искажают информацию о возможностях лазеров. Приведем лишь несколько примеров.

*Сколько ни дыми, все равно не увидишь.* Во многих фильмах для обнаружения охранной сигнализации герои пускают клубы дыма — и лучи лазера становятся видимыми. На самом деле изготовить лазеры, работающие в инфракрасном (невидимом для глаза) диапазоне, намного проще, чем работающие в видимом диапазоне. Именно их и используют в стандартных охранных системах. Инфракрасный луч, сколько его не задымляй, все равно остается невидимым для глаз.

*Берегите глаза.* Лазеры в фильмах используют для разрезания металлических препятствий (решетки, дверей сейфа и т. п.) — и это соответствует действительности. Вот только авторы фильмов часто забывают о защите героев от отраженных лучей, ведь отражение сверхмощного луча от разрезаемого металла будет тоже достаточно мощным. А значит, как минимум, следует беречь глаза!

*Попробуй догони.* Иногда создатели фильмов демонстрируют, что процесс распространения луча подобен полету пули. Это, конечно, не так. Скорость пули составляет несколько сотен метров в секунду, поэтому ее полет действительно может быть зарегистрирован с помощью скоростной киносъемки. А вот аналогичным образом проследить за процессом распространения луча света невозможно (напомним, что скорость света огромна — 300 000 км/с).





## Ориентировочные темы проектов

1. Изготовление простейших оптических приборов и устройств.
2. Оптические иллюзии.
3. Исследование мощности и КПД искусственных источников света разных типов.
4. Вогнутые зеркала: свойства и примеры применения.
5. Оптические явления в природе.
6. Глаз и зрение.

## Темы рефератов и сообщений

1. Будущее — за светодиодами.
2. Чудо фотосинтеза.
3. Миражи: как они возникают и где их можно наблюдать.
4. Зачем пешеходу на одежде светоотражающие поверхности. Как светоотражающие поверхности используют автомобилисты.
5. Цвет и свет.
6. Почему ночью мы почти не различаем цвета.
7. Оптическое искусство «Оп-арт» как синтез науки и искусства.
8. Нарушения зрения и методы их коррекции с помощью оптических устройств.
9. Зрительные тренажеры. Почему и как можно восстановить зрение.
10. Оптические приборы в медицине.
11. История фотографии.
12. Ультрафиолетовое очищение воды.
13. Почему мыльные пузыри разноцветные.
14. Приборы ночного видения.
15. Подзорная труба: история создания, устройство, принцип действия.

## Темы экспериментальных исследований

1. Изучение законов распространения света с помощью лазерной указки.
2. Изучение законов преломления света и связанных с ними оптических эффектов. Оптические фокусы.
3. Исследование спектрального состава света с помощью призмы (воспроизведение опытов И. Ньютона).
4. Исследование преломляющих свойств собирающей и рассеивающей линз.
5. Изготовление оптических устройств (камера-обскура, калейдоскоп).

# РАЗДЕЛ III

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

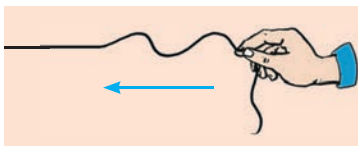
- Вы знаете, что бóльшую часть информации об окружающем мире человек получает через зрение и слух, а теперь узнаете, что общего в передаче информации с помощью света и звука
- Каждый из вас умеет пользоваться мобильным телефоном, а теперь вы узнаете, как работает сотовая связь
- Вы слышали о гибели «Титаника», а теперь узнаете, почему современные океанские лайнеры вряд ли постигнет его судьба
- Вы не раз слышали эхо, а теперь узнаете, как оно помогает измерить глубину океана
- Вы хорошо знаете, что такое рентген, а теперь узнаете, что общего между рентгеновскими и световыми лучами



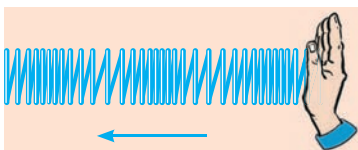
## § 17. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВОЛНЫ



**Рис. 17.1.** От камешка, брошенного в воду, по поверхности воды распространяются волны



**Рис. 17.2.** Распространение волны вдоль веревки. Стрелка показывает направление распространения волны



**Рис. 17.3.** Распространение волны в пружине. Стрелка показывает направление распространения волны

В курсе физики 7 класса вы изучали механические колебания. Часто бывает так, что, возникнув в одном месте, колебания распространяются в соседние области пространства. Вспомните, например, распространение колебаний от брошенного в воду камешка или колебания земной коры, распространяющиеся от эпицентра землетрясения. В таких случаях говорят о волновом движении — волнах (рис. 17.1). Из этого параграфа вы узнаете об особенностях волнового движения.

### 1 Создаем механические волны

Возьмем довольно длинную веревку, один конец которой прикрепим к вертикальной поверхности, а второй будем двигать вниз-вверх (колебать). Колебания от руки распространятся по веревке, постепенно вовлекая в колебательное движение все более удаленные точки, — по веревке побежит *механическая волна* (рис. 17.2).

**Механической волной** называют распространение колебаний в упругой среде\*.

Теперь закрепим горизонтально длинную мягкую пружину и нанесем по ее свободному концу серию последовательных ударов — в пружине побежит волна, состоящая из сгущений и разрежений витков пружины (рис. 17.3).

Описанные выше волны можно увидеть, однако большинство механических волн невидимы, например звуковые волны (рис. 17.4).

На первый взгляд, все механические волны абсолютно разные, но причины их возникновения и распространения одинаковы.

### 2 Выясняем, как и почему в среде распространяется механическая волна

Любая механическая волна создается колеблющимся телом — *источником волны*. Осуществляя колебательное движение, источник волны *деформирует* ближайшие к нему слои

\* Среду называют *упругой*, если при ее деформации возникают силы, противодействующие этой деформации, — *силы упругости*.

среды (сжимает и растягивает их либо сдвигает). В результате возникают *силы упругости*, которые действуют на соседние слои среды и заставляют их осуществлять *вынужденные колебания*. Эти слои, в свою очередь, деформируют следующие слои и заставляют их колебаться. Постепенно, один за другим, все слои среды вовлекаются в колебательное движение — в среде распространяется механическая волна.

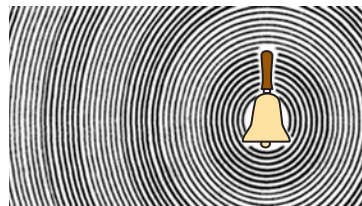
### 3 Различаем поперечные и продольные механические волны

Сравним распространение волны вдоль веревки (см. рис. 17.2) и в пружине (см. рис. 17.3).

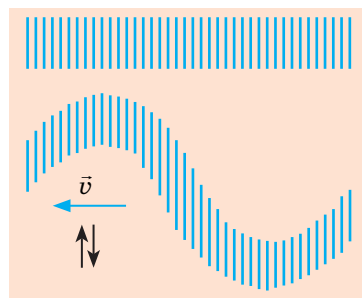
Отдельные части веревки *движутся (колеблются) перпендикулярно направлению распространения волны* (на рис. 17.2 волна распространяется справа налево, а части веревки движутся вниз-вверх). Такие волны называют **поперечными** (рис. 17.5). При распространении поперечных волн происходит смещение одних слоев среды относительно других. *Деформация смещения сопровождается возникновением сил упругости только в твердых телах*, поэтому поперечные волны не могут распространяться в жидкостях и газах. Итак, *поперечные волны распространяются только в твердых телах*.

При распространении волны в пружине витки пружины *движутся (колеблются) вдоль направления распространения волны*. Такие волны называют **продольными** (рис. 17.6). Когда распространяется продольная волна, в среде происходят *деформации сжатия и растяжения* (вдоль направления распространения волны плотность среды то увеличивается, то уменьшается). Такие деформации *в любой среде сопровождаются возникновением сил упругости*. Поэтому *продольные волны распространяются и в твердых телах, и в жидкостях, и в газах*.

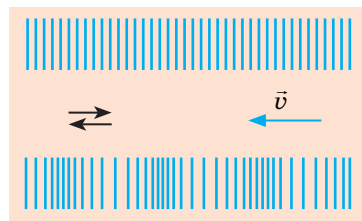
Волны на поверхности жидкости не являются ни продольными, ни поперечными. Они имеют *сложный продольно-поперечный характер*, при этом частицы жидкости движутся по эллипсам. В этом легко убедиться, если бросить в море легкую щепку и понаблюдать за ее движением на поверхности воды.



**Рис. 17.4.** Колебания звучащего тела являются причиной поочередных сгущений и разрежений среды — в среде распространяется звуковая волна



**Рис. 17.5.** В поперечной волне слои среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны



**Рис. 17.6.** В продольной волне слои среды колеблются вдоль направления распространения волны

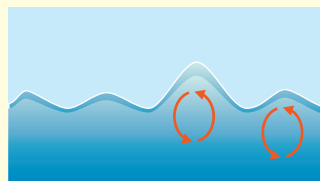




Рис. 17.7. К вопросу в § 17

#### 4 Выясняем основные свойства волн

1. Колебательное движение от одной точки среды к другой передается не мгновенно, а с некоторым опозданием, поэтому *волны распространяются в среде с конечной скоростью.*

2. Источник механических волн — колеблющееся тело. При распространении волны колебания частей среды — вынужденные, поэтому *частота колебаний каждой части среды равна частоте колебаний источника волн.*

3. *Механические волны не могут распространяться в вакууме.*

4. *Волновое движение не сопровождается переносом вещества* — части среды всего лишь колеблются относительно положений равновесия.

5. С приходом волны части среды приходят в движение (приобретают кинетическую энергию). Это означает, что *при распространении волн происходит перенос энергии.*

**Перенос энергии без переноса вещества — важнейшее свойство любой волны.**

? вспомните распространение волн по поверхности воды (рис. 17.7). Какие наблюдения подтверждают основные свойства волнового движения?

#### 5 Вспоминаем физические величины, характеризующие колебания

Волна — это распространение колебаний, поэтому физические величины, характеризующие колебания (*частота, период, амплитуда*), также характеризуют и волну. Итак, вспомним материал 7 класса:

	Физические величины, характеризующие колебания		
	Частота колебаний $\nu$	Период колебаний $T$	Амплитуда колебаний $A$
Определение	количество колебаний за единицу времени	время одного колебания	максимальное расстояние, на которое отклоняется точка от положения равновесия
Формула для определения	$\nu = \frac{N}{t}$ $N$ — количество колебаний за интервал времени $t$	$T = \frac{t}{N}$	—
Единица в СИ	герц (1 Гц = 1 с <sup>-1</sup> )	секунда (с)	метр (м)



**Обратите внимание!** При распространении механической волны все части среды, в которой распространяется волна, колеблются с одинаковой частотой ( $\nu$ ), которая равна частоте колебаний источника волны, поэтому период колебаний ( $T$ ) для всех точек среды тоже одинаков, ведь  $T = \frac{1}{\nu}$ . А вот амплитуда колебаний постепенно уменьшается с удалением от источника волны.

## 6 Выясняем длину и скорость распространения волны

Вспомните распространение волны вдоль веревки. Пусть конец веревки осуществил одно полное колебание, то есть время распространения волны равно одному периоду ( $t = T$ ). За это время волна распространилась на некоторое расстояние  $\lambda$  (рис. 17.8, а). Это расстояние называют *длиной волны*.

**Длина волны  $\lambda$**  — расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду  $T$ :

$$\lambda = vT,$$

где  $v$  — скорость распространения волны.

**Единица длины волны в СИ — метр:**

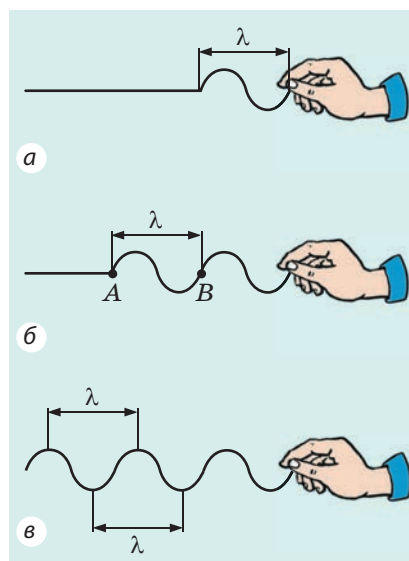
$$[\lambda] = 1 \text{ м}.$$

Нетрудно заметить, что точки веревки, расположенные друг от друга на расстоянии одной длины волны, колеблются синхронно — имеют одинаковую *фазу колебаний* (рис. 17.8, б, в). Например, точки А и В веревки одновременно движутся вверх, одновременно достигают гребня волны, затем одновременно начинают двигаться вниз и т. д.

Воспользовавшись формулой  $\lambda = vT$ , можно определить скорость распространения волны:  $v = \frac{\lambda}{T}$ . Учитывая, что  $\frac{1}{T} = \nu$ , получим **формулу взаимосвязи длины, частоты и скорости распространения волны — формулу волны:**

$$v = \lambda \nu$$

Если волна переходит из одной среды в другую, скорость ее распространения изменяется, а частота остается неизменной, поскольку частота определяется источником волны. Таким образом, согласно формуле  $v = \lambda \nu$  при переходе волны из одной среды в другую *длина волны изменяется*.



**Рис. 17.8.** Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется волна за время одного колебания (это также расстояние между двумя ближайшими гребнями или двумя ближайшими впадинами)

### Формула волны

$$v = \lambda \nu$$

$v$  — скорость распространения волны;

$\lambda$  — длина волны;

$\nu$  — частота волны

## 7 Учимся решать задачи

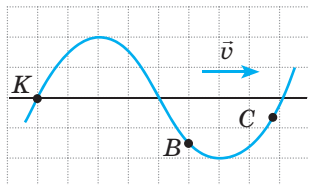


Рис. 1

**Задача.** Поперечная волна распространяется вдоль шнура со скоростью 3 м/с. На рис. 1 показано положение шнура в некоторый момент времени и направление распространения волны. Считая, что сторона клетки равна 15 см, определите:

- 1) амплитуду, период, частоту и длину волны;
- 2) направление, в котором в данный момент времени движутся точки K, B и C шнура.

*Анализ физической проблемы, решение*

Волна поперечная, поэтому точки шнура колеблются перпендикулярно направлению распространения волны (смещаются вниз-вверх относительно некоторых положений равновесия).

1) Из рис. 1 видим, что максимальное отклонение от положения равновесия (амплитуда  $A$  волны) равно 2 клеткам. Значит,  $A = 2 \cdot 15 \text{ см} = 30 \text{ см}$ .

Расстояние между гребнем и впадиной — 60 см (4 клетки), соответственно расстояние между двумя ближайшими гребнями (длина волны) вдвое больше. Значит,  $\lambda = 2 \cdot 60 \text{ см} = 120 \text{ см} = 1,2 \text{ м}$ .

Частоту  $\nu$  и период  $T$  волны найдем, воспользовавшись формулой волны:

$$v = \lambda \nu \Rightarrow \nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \text{ м/с}}{1,2 \text{ м}} = 2,5 \frac{1}{\text{с}} = 2,5 \text{ Гц};$$

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ (с)}.$$

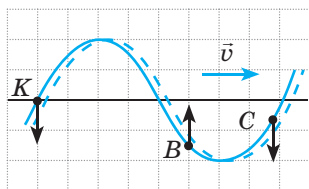


Рис. 2

2) Чтобы выяснить направление движения точек шнура, выполним дополнительное построение. Пусть за небольшой интервал времени  $\Delta t$  волна сместилась на некоторое небольшое расстояние. Поскольку волна смещается вправо, а ее форма со временем не изменяется, точки шнура займут положение, показанное на рис. 2 пунктиром.

Волна поперечная, то есть точки шнура движутся перпендикулярно направлению распространения волны. Из рис. 2 видим, что точка K через интервал времени  $\Delta t$  окажется ниже своего начального положения, следовательно, скорость ее движения направлена вниз; точка B переместится выше, следовательно, скорость ее движения направлена вверх; точка C переместится ниже, следовательно, скорость ее движения направлена вниз.

**Ответ:**  $A = 30 \text{ см}$ ;  $T = 0,4 \text{ с}$ ;  $\nu = 2,5 \text{ Гц}$ ;  $\lambda = 1,2 \text{ м}$ ; K и C — вниз, B — вверх.



## Подводим итоги

Распространение колебаний в упругой среде называют механической волной. Механическую волну, в которой части среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, называют поперечной; волну, в которой части среды колеблются вдоль направления распространения волны, называют продольной.

Волна распространяется в пространстве не мгновенно, а с некоторой скоростью. При распространении волны происходит перенос энергии без переноса вещества. Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду, называют длиной волны — это расстояние между двумя ближайшими точками, которые колеблются синхронно (имеют одинаковую фазу колебаний). Длина  $\lambda$ , частота  $\nu$  и скорость  $v$  распространения волны связаны формулой волны:  $v = \lambda\nu$ .



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение механической волны.
2. Опишите механизм образования и распространения механической волны.
3. Назовите основные свойства волнового движения.
4. Какие волны называют продольными? поперечными? В каких средах они распространяются?
5. Что такое длина волны? Как ее определяют?
6. Как связаны длина, частота и скорость распространения волны?



### Упражнение № 17

1. Определите длину каждой волны на рис. 1.
2. В океане длина волны достигает 270 м, а ее период равен 13,5 с. Определите скорость распространения такой волны.
3. Совпадают ли скорость распространения волны и скорость движения точек среды, в которой распространяется волна?
4. Почему механическая волна не распространяется в вакууме?
5. В результате взрыва, произведенного геологами, в земной коре распространилась волна со скоростью 4,5 км/с. Отраженная от глубоких слоев Земли, волна была зафиксирована на поверхности Земли через 20 с после взрыва. На какой глубине залегает порода, плотность которой резко отличается от плотности земной коры?
6. На рис. 2 изображены две веревки, вдоль которых распространяется поперечная волна. На каждой веревке показано направление колебаний одной из ее точек. Определите направления распространения волн.
7. На рис. 3 изображено положение двух шнуров, вдоль которых распространяется волна, показано направление распространения каждой волны. Для каждого случая *a* и *б* определите: 1) амплитуду, период, длину волны; 2) направление, в котором в данный момент времени движутся точки *A*, *B* и *C* шнура; 3) количество колебаний, которые совершает любая точка шнура за 30 с. Считайте, что сторона клетки равна 20 см.
8. Человек, стоящий на берегу моря, определил, что расстояние между соседними гребнями волн равно 15 м. Кроме того, он подсчитал, что за 75 с до берега доходит 16 волновых гребней. Определите скорость распространения волн.

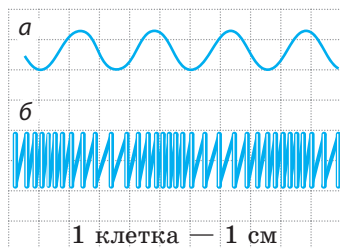


Рис. 1

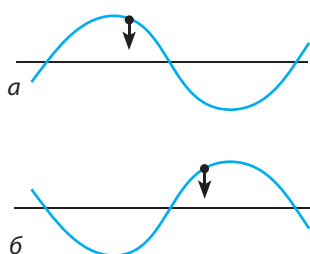


Рис. 2

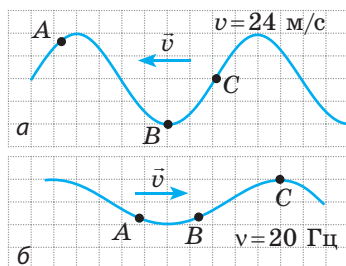
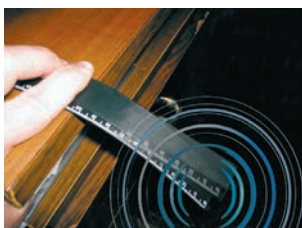


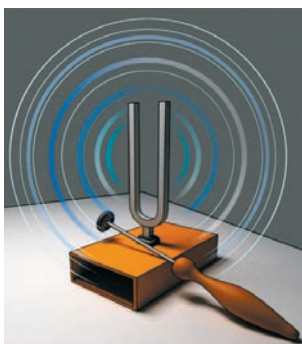
Рис. 3

## § 18. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. ИНФРАЗВУК И УЛЬТРАЗВУК

Мы живем в океане звуков. Что представляют собой звуки? Как они образуются? Почему невозможно услышать гул ракетных двигателей в космосе? Почему гром слышится позже, чем видна вспышка молнии? Для чего в студиях звукозаписи стены покрывают слоем звукопоглощающих материалов? Как в полной темноте летучие мыши и дельфины находят добычу? Попробуем найти ответы на эти вопросы.



**Рис. 18.1.** После того как конец линейки будет отпущен, линейка начнет колебаться, издавая звук



**Рис. 18.2.** Ножки камертона колеблются и издают звук

### 1 Знакомимся с источниками и приемниками звука

Один конец линейки прижмите к краю стола, а второй оттяните вниз и отпустите — он начнет колебаться, и вы услышите звук (рис. 18.1). Дело в том, что колебание линейки вызывает сгущение и разрежение воздуха и как следствие — периодические увеличения и уменьшения давления в зоне колебаний. Сжатый воздух, пытаясь расшириться, давит на соседние слои и сжимает их. Так от линейки во все стороны начинает распространяться продольная механическая волна, которая в конце концов достигает вашего уха. В результате давление воздуха вблизи ушной мембраны периодически изменяется, и мембрана начинает колебаться. Конец линейки колеблется с частотой выше 20 Гц, именно с такой частотой начинает колебаться и ушная мембрана, а колебания с частотой 20–20 000 Гц человек воспринимает как звук.

**Звук** — это физическое явление, представляющее собой механическую волну частотой от 20 до 20 000 Гц.

**Источники звука** — это тела, колеблющиеся с частотой 20–20 000 Гц. Так, источниками звука являются мембраны наушников и струны музыкальных инструментов, диффузоры громкоговорителей и крылья насекомых, части машин и т. п. В трубе, флейте, свистке звук образуется в результате колебания столба воздуха внутри инструментов. Голосовые аппараты человека и животных тоже являются источниками звука.

**?** Назовите еще несколько источников звука.

Для изучения звука удобно использовать *камертон* (рис. 18.2). Это устройство представляет собой металлическую «рогатку», закрепленную на ящичке, в котором отсутствует одна стенка. Если резиновым молоточком ударить по ножкам камертона, камертон издаст ясный длинный звук,

который постепенно ослабевает, но не изменяет своей частоты.

В **приемниках звука** происходит преобразование звуковых сигналов в другие сигналы, благодаря чему звук можно воспринимать и анализировать. Органы слуха человека и животных — приемники звука, в которых звуковые (механические) колебания преобразуются в нервные импульсы. В технике для приема звука в основном применяют преобразователи, в которых звуковые колебания обычно преобразуются в электрические (рис. 18.3).



**Рис. 18.3.** В микрофоне звуковые колебания преобразуются в электрические

## 2 Измеряем скорость распространения звука

Если мы видим момент зарождения звука издали (удар колокола, хлопок ладоней и т. д.), то замечаем, что сам звук мы слышим через некоторый интервал времени. Зная расстояние до источника звука и время «опоздания», можно измерить *скорость распространения звука в воздухе*. Впервые ее измерил французский ученый *Марин Мерсенн* (1588–1648) в 1636 г.

При температуре 20 °С скорость звука в воздухе равна примерно 340 м/с. Это почти в миллион раз меньше скорости распространения света. Именно поэтому гром слышен позже, чем видна вспышка молнии (рис. 18.4).

*Скорость распространения звука зависит от температуры, плотности 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. К тому же чем меньше масса молекул среды, тем быстрее распространяется звук. При решении задач мы будем использовать приблизительные значения скорости распространения звука (см. таблицу на с. 120).



**Рис. 18.4.** Если гроза от нас далеко, то грохот грома можно услышать даже через 10–20 с после вспышки молнии

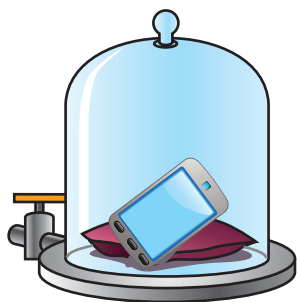
Первые точные измерения *скорости распространения звука в воде* провели ученые из Швейцарии *Жан Колладон* и *Шарль Штурм* в 1826 г.

Один из исследователей сидел в лодке на Женевском озере и ударял по погруженному в воду колоколу. Одновременно с ударом происходила вспышка пороха. Второй исследователь, находясь на расстоянии 16 км, измерял время между вспышкой пороха и звуком от удара колокола, который он слышал через погруженную в воду озера трубу.



*Приблизительные значения скорости распространения звука в некоторых средах*

Среда	$v$ , м/с
Вода	1500
Водород	1250
Железо, сталь, чугун	5000
Воздух	340
Стекло	4500



**Рис. 18.5.** Если положить мобильный телефон под купол воздушного насоса и откачать воздух, то сигнал вызова мы не услышим

Кроме громкости и высоты тона мы различаем звуки по **тембру**: одну и ту же ноту, взятую на рояле, саксофоне или разными людьми, мы воспринимаем по-разному. Такие разные «оттенки» звуков называют тембрами.

Дело в том, что звуки являются сложными: кроме основной частоты (по которой мы и оцениваем высоту звука) любой звук содержит несколько более слабых и более высоких дополнительных частот — **обертонов**. Чем больше обертонов содержит основной звук, тем он богаче.

**?** Проанализируйте таблицу. Как вы думаете, почему скорость распространения звука в водороде больше, чем в воздухе, а в стали больше, чем в воде?

*Обратите внимание!* Поскольку звук — это механическая волна, а для распространения механической волны необходима среда, *звуковая волна не распространяется в вакууме (рис. 18.5).*

### 3 Изучаем характеристики звука

Звуки разной частоты мы воспринимаем как звуки разного тона: *чем больше частота звука, тем выше тон звука*, и наоборот. Мы легко отличаем высокий тон жужжания комара от низкого тона гудения шмеля, звучание скрипки — от звучания контрабаса.

**Громкость звука** определяется прежде всего *амплитудой* звуковой волны (максимальным изменением давления): чем больше амплитуда, тем громче звук. Громкость звука зависит также от его тона (частоты звуковой волны). Человеческое ухо плохо воспринимает звуки низких частот (около 20 Гц) и высоких частот (около 20 000 Гц), лучше всего оно воспринимает звуки средних частот (1000–3000 Гц).

При распространении звука происходит его постепенное *рассеяние и угасание*, а значит, и *уменьшение громкости*. Знание закономерностей рассеяния звука важно для определения дальности распространения звукового сигнала. Так, на дальность распространения звука в воздухе влияют температура и атмосферное давление, сила и скорость ветра и др. Иногда в глубинах океана образуются условия для сверхдального (свыше 5000 км) распространения звука — в таком случае говорят о подводном звуковом канале.

### 4 Наблюдаем отражение звука

Сравнив распространение звука и распространение света, можно заметить некоторые общие черты. И это не случайно: свет тоже является волной, но не механической (об этом вы узнаете позже). На границе раздела разных сред звуковая волна, как и свет, испытывает преломление, поглощение и отражение. Рассмотрим подробнее отражение звука.

Если встать на некотором расстоянии от скалы или одиночного небоскреба и хлопнуть в ладоши или громко крикнуть, через небольшой интервал времени услышим повторение звука — **эхо** (рис. 18.6).

**Эхо** — это звук, отраженный от удаленного препятствия.

Если расстояние до препятствия достаточно велико, а звук короткий (удар, вскрик), мы слышим четкое повторение звука. Если звук длинный, то эхо смешивается с начальным звуком и отраженный звук будет нечетким.

**?** После удара грома мы еще некоторое время слышим его раскаты. Почему?

На явлении отражения звука основано действие шумозащитных экранов, которые устанавливают вдоль автомобильных трасс и вблизи аэропортов. Исследование отражения, рассеяния и угасания звука в газах, жидкостях и твердых телах позволяет получить информацию о внутреннем строении среды, в которой распространяется звук.

## 5 Различаем инфразвук и ультразвук

Звуковые волны, частота которых меньше 20 Гц, называют **инфразвуковыми** (от лат. *infra* — ниже, под).

Инфразвуковые волны возникают во время работы некоторых механизмов, при взрывах, обвалах, мощных порывах ветра, во время шторма, землетрясения и т. п.

Инфразвук очень опасен для животных и человека: он может вызвать симптомы морской болезни, головокружение, потерю зрения, быть 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 инфразвук.

Звуковые волны, частота которых превышает 20 кГц, называют **ультразвуковыми** (от лат. *ultra* — сверх, за пределами).

Ультразвук есть в шуме ветра и водопада, в звуках, которые издают некоторые живые существа. Ультразвук до 100 кГц воспринимают многие насекомые и грызуны (рис. 18.7); улавливают такие колебания и собаки. Интересно, что дети, в отличие от взрослых, тоже слышат ультразвуковые сигналы (до 24 000 Гц).

Некоторые животные применяют ультразвук для ориентации или охоты. Так, летучие



**Рис. 18.6.** Эхо образуется вследствие отражения звука



**Рис. 18.7.** Ультразвуковой излучатель для отпугивания насекомых



**Рис. 18.8.** Во время охоты летучие мыши используют эхолокацию

мыши и дельфины излучают ультразвук и воспринимают его эхо, благодаря чему они даже в полной темноте могут найти дорогу или поймать добычу. Говорят, что в таких случаях животные используют эхолокацию (рис. 18.8).

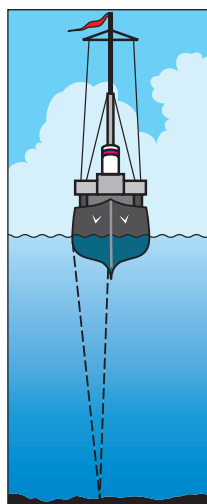
**Эхолокация** — способ обнаружения и получения информации об объекте с помощью эха.

Люди научились применять эхолокацию в разных областях, причем чаще всего для эхолокации используют именно ультразвук.

Например, в медицине эхолокация позволяет «увидеть» еще не родившегося ребенка, исследовать состояние внутренних органов, обнаружить посторонние тела в тканях. В технике эхолокацию применяют для выявления дефектов в изделиях, измерения глубин морей и океанов (рис. 18.9) и т. д.

Кроме того, ультразвуком обеззараживают хирургические инструменты, лекарства, руки хирургов. Лечение с помощью ультразвука иногда позволяет избежать хирургических операций.

Ультразвук применяют также для обработки прочных материалов, очистки поверхностей от загрязнений и т. п.



**Рис. 18.9.** Измерение глубины водоема с помощью эхолокации



### Контрольные вопросы

1. Что такое звук?
2. Приведите примеры источников и приемников звука.
3. Почему источник звука издает звук?
4. От чего зависит скорость распространения звука?
5. Какая физическая величина характеризует высоту тона звука?
6. От чего зависит громкость звука?
7. Следствием какого явления является эхо?
8. Что такое инфразвук? Как он влияет на человека?
9. Что такое ультразвук? Приведите примеры применения ультразвука в природе, медицине, технике.
10. Что такое эхолокация?



### Упражнение № 18

1. Ножки камертона колеблются с частотой 440 Гц. Воспринимаем ли мы волну, распространяющуюся от ножек камертона, как звук?
2. Почему летящую бабочку не слышно, а когда летит комар, мы слышим жужжание?
3. Определите длину звуковой волны частотой 4 кГц в воздухе; воде; стали.

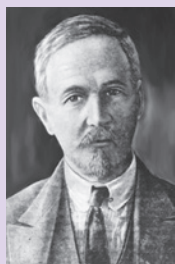
4. Почему музыка и голоса певцов по-разному звучат в пустом зале и в зале, заполненном публикой?
5. С помощью ультразвука измеряли глубину моря (см. [рис. 18.9](#)). Сигнал, отраженный от морского дна, был зафиксирован через 4 с после его отправления. Какова глубина моря в месте измерения?
6. Сколько колебаний осуществляет источник звука за 5 с, если длина волны в воздухе равна 1 м?
7. *Скорость распространения звука в металле* первым определил французский физик *Жан-Батист Био* (1774–1862). Он использовал чугунную трубу парижского водопровода (длиной 951 м). Когда по одному концу трубы ударили молотком, то с другого конца слышали двойной удар. На сколько секунд звук, шедший по чугуну, обгонял звук, шедший по воздуху?
8. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, где используют ультразвук.
9. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о влиянии шума на здоровье человека. Как уменьшить вредное воздействие шума?
10. Источник света и зеркало расположены на расстоянии 10,8 км друг от друга. Через какое время вспышка света достигнет зеркала и вернется обратно?



### Экспериментальные задания

1. «Почти Пифагор». Исследования звуков, которые издает колеблющаяся струна, проводил еще древнегреческий ученый Пифагор (VI в. до н. э.). Он изучал зависимость высоты тона звука от длины струны. Воспользовавшись натянутой нитью, определите, как высота тона звука зависит от длины нити.
2. «Музыкальная линейка». Повторите опыт, изображенный на [рис. 18.1](#). Уменьшая длину колеблющейся части линейки, докажете, что, чем меньше эта длина, тем больше частота издаваемого звука.
3. «Чувствительный шарик». Используя подвешенный на нити легкий шарик, докажете, что, когда камертон издает звук, ножки камертона колеблются, а громкость звука зависит от амплитуды колебаний.

### Физика и техника в Украине



**Борис Павлович Грабовский** (1901–1966) — украинский физик и изобретатель, создатель электронной системы передачи движущегося изображения на расстоянии (на ее принципах работает современное телевидение); сын выдающегося украинского поэта Павла Грабовского.

Первое изобретение Б. П. Грабовского — катодный коммутатор, ставший основой устройства передающей телевизионной трубки; следующее — проект телеустановки, которую автор назвал «радиотелефот».

26 июля 1928 г. в Ташкенте состоялся эксперимент, во время которого впервые в мире с помощью электронного метода транслировалось движущееся изображение (лицо лаборанта). Среди изобретений Бориса Грабовского — малоли-traжный вертолет, трехкрылый планер, прибор для ориентирования слепых и аппарат для глухонемых. Запатентованная ученым идея получения катодного луча была успешно использована в Институте электросварки.

В 1977 г. в Ташкенте создан Музей электронного телевидения им. Б. Грабовского. Есть музей Бориса Грабовского в Тюмени, а также в селе Пушкарном (теперь Грабовском) на Сумщине.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6



**Тема.** Исследование звуковых колебаний разных источников звука с помощью современных цифровых средств.

**Цель:** установить связь характеристик звуковой волны (амплитуда, частота) с громкостью и высотой тона звука.

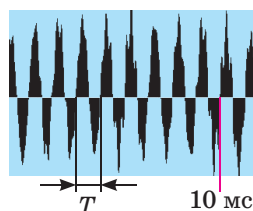
**Оборудование:** компьютер (или мобильный телефон) с программным обеспечением для записи звука и обработки полученного файла (например, WavePad), микрофон, камертон, генератор звуковых частот (или программа «Камертон»).

## Теоретические сведения

Форма записи звука может быть разной: магнитная, оптическая, цифровая и т. д. Запись звука в компьютерах — исключительно цифровая. Записанный звук хранится в аудиофайле и после обработки может быть выведен на монитор компьютера в виде пульсирующего графика, который отражает изменение давления в зоне прослушивания через равные небольшие интервалы времени (см. рисунок). По такому графику можно оценить:

- 1) *громкость звука* — определяется амплитудой  $A$  звуковой волны;
- 2) *тон звука* — определяется частотой  $\nu$  (периодом  $T$ ) звуковой волны.

Например, по графику на рисунке выясняем, что за 10 мс произошло почти 9 колебаний (точнее — 8,8), значит, частота звуковой волны составляет:  $\nu = 8,8 / 0,01 \text{ с} = 880 \text{ Гц}$ . Таким образом, на графике приведена цифровая запись звучания ноты «ля» второй октавы (см. таблицу).



Нота	Частота $\nu$ , Гц		Нота	Частота $\nu$ , Гц	
	первая октава	вторая октава		первая октава	вторая октава
До	261,63	523,26	Соль	392,00	784,00
Ре	293,66	587,32	Ля	440,00	880,00
Ми	329,63	659,26	Си	493,88	987,76
Фа	349,23	698,46			

## УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

## II Подготовка к эксперименту

1. Перед выполнением работы вспомните: 1) требования безопасности при выполнении лабораторных работ; 2) основные характеристики звука.
2. Включите компьютер, присоедините к нему микрофон.
3. Запустите на выполнение программу «Звукозапись» (из набора стандартных программ ОС Windows), для чего щелкните кнопку «Пуск» и выберите команды: Программы → Стандартные → Развлечения → Звукозапись.



### Эксперимент

Строго придерживайтесь инструкции по безопасности (см. форзац). Полученные аудиофайлы сохраните под соответствующими именами.

1. Включите генератор звуковой частоты, настройте исходящий сигнал на частоту 440 Гц.
2. Включите запись сигнала. Выключите запись через 4–6 с.
3. Увеличьте громкость сигнала генератора, не изменяя частоты, и повторите действия, описанные в п. 2.
4. Настройте исходящий сигнал на частоту 880 Гц и повторите действия, описанные в п. 2.
5. Поставьте камертон. Ударьте по нему резиновым молоточком и повторите действия, описанные в п. 2.
6. Спойте в микрофон несколько нот, для каждой ноты повторяя действия, описанные в п. 2.

### Обработка результатов эксперимента

Результаты измерений и вычислений сразу заносите в таблицу.

1. Для каждого опыта определите частоту звуковой волны. Для этого:
  - 1) откройте аудиофайл (на экране вы увидите график, похожий на приведенный на рисунке);
  - 2) вычислите количество колебаний, например, за 10 мс;
  - 3) по формуле  $\nu = N/t$  вычислите частоту звуковой волны.

Номер опыта	Название опыта	Время колебаний $t$ , мс	Количество колебаний $N$	Частота волны $\nu$ , Гц
1				
...				

2. Сделайте скриншоты для любых трех опытов, распечатайте их и вклейте в тетрадь (или выполните рисунки). Подпишите эти опыты.

### Анализ результатов эксперимента

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором: 1) полученные результаты сравните с заданными частотами генератора, частотой камертона, значениями частот, соответствующих определенным нотам; 2) укажите причины расхождения результатов.

### Задание «со звездочкой»

По формуле  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{\nu_{\text{измеренная}}}{\nu_{\text{заданная}}} \right| \cdot 100\%$  оцените относительную погрешность одного из экспериментов.

### Творческое задание

Подумайте, как выяснить, какие материалы лучше поглощают звук, в каких материалах звук лучше распространяется. Составьте план проведения эксперимента. Проведите эксперимент, запишите его результаты.

## § 19. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Читали ли вы в детстве сказки? Вспомните: «катится золотое яблочко по серебряному блюдецку», и герой сказки видит «горы высокие, моря глубокие» и многое другое, что происходит за «семью морями и семью горами». Что вам напоминает это сказочное устройство? Наверное, в том числе и мобильный Интернет. О том, какие открытия в физике позволили изобрести такую «сказочную» вещь, пойдет речь в этом параграфе.



**Рис. 19.1.** Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) — английский физик и математик, творец классической электродинамики, один из основателей статистической физики

### 1 Узнаём об электромагнитном поле

Напомним: существуют два вида материи — *вещество* и *поле*. Оба *существуют реально*, а не представляют собой некую «модель», предназначенную для объяснения тех или иных физических явлений.

В прошлом учебном году вы узнали об *электрическом поле*, в этом году — о *магнитном поле*. Вы также выяснили, что *изменяющееся магнитное поле* не только действует на движущиеся заряженные частицы и намагниченные тела, но и *создает электрическое поле*. К такому выводу пришел в свое время *Майкл Фарадей*.

Руководствуясь принципом симметрии, *Джеймс Максвелл* (рис. 19.1) выдвинул подтвержденную со временем гипотезу о том, что не только изменяющееся магнитное поле создает электрическое поле, а и изменяющееся электрическое поле создает магнитное. Согласно этой гипотезе *электрические и магнитные поля всегда существуют вместе* и нет смысла рассматривать их как отдельные объекты. То есть существует единое **электромагнитное поле**, а электрическое и магнитное поля — это две составляющие (две формы проявления) *электромагнитного поля*.

**Электромагнитное поле** — вид материи, с помощью которого осуществляется взаимодействие между заряженными телами и частицами и намагниченными телами.

Кто-то может не согласиться с выводом Максвелла, вспомнив, что, например, вблизи неподвижного заряженного тела существует только электрическое поле, а вблизи неподвижного постоянного магнита — только магнитное поле. Но ведь движение и покой зависят от выбора системы отсчета!

Представьте: держа в руках заряженный шарик, вы идете к своему товарищу. Если бы человек мог «видеть» электромагнитное поле, в данном случае вы «видели» бы только одну его составляющую — электрическое поле, так как относительно вас заряд неподвижен. В то же время ваш товарищ «видел» бы и электрическое поле, и магнитное, потому что относительно него заряд движется и электрическое поле изменяется (см. рис. 19.2).

**?** Если ваш товарищ возьмет магнит и будет удаляться от вас (см. рис. 19.3), кто «обнаружит» только магнитное поле, а кто — и магнитное, и электрическое?

Таким образом, утверждение, что в данной точке существует только электрическое (или только магнитное) поле, не имеет смысла, ведь не указана система отсчета. Вместе с тем мы никогда не найдем систему отсчета, относительно которой «исчезли» бы обе составляющие электромагнитного поля, ведь *электромагнитное поле материально*.

## 2 Создаем электромагнитные волны

Проанализировав все известные законы электродинамики, Дж. Максвелл исключительно математически получил фантастический на то время вывод: в природе должны существовать *электромагнитные волны*.

**Электромагнитная волна** — это распространение в пространстве переменного электромагнитного поля.

Попробуем представить, как образуется и распространяется электромагнитная волна. Возьмем проводник, в котором течет переменный ток (рис. 19.4). Как известно, вблизи любого проводника с током существует магнитное поле. Магнитное поле, созданное переменным током, тоже является переменным. Согласно теории Максвелла переменное магнитное поле должно создать электрическое поле, которое тоже будет переменным. Переменное электрическое поле создаст переменное магнитное поле и т. д. Таким образом получим *распространение колебаний электромагнитного поля — электромагнитную волну* (рис. 19.5). Частота этой волны равна частоте, с которой изменяется сила тока в проводнике, а *проводник с переменным током является источником электромагнитной волны*.

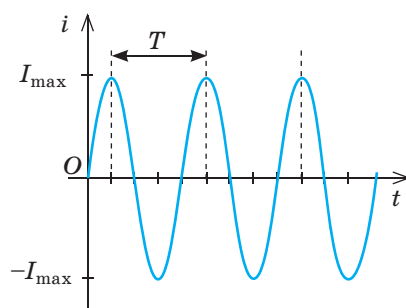
Электромагнитная волна, как и механическая (вспомните распространение волны от брошенного в воду камешка), может оторваться от своего источника и начать самостоятельно распространяться в пространстве. Интересно, что некоторые



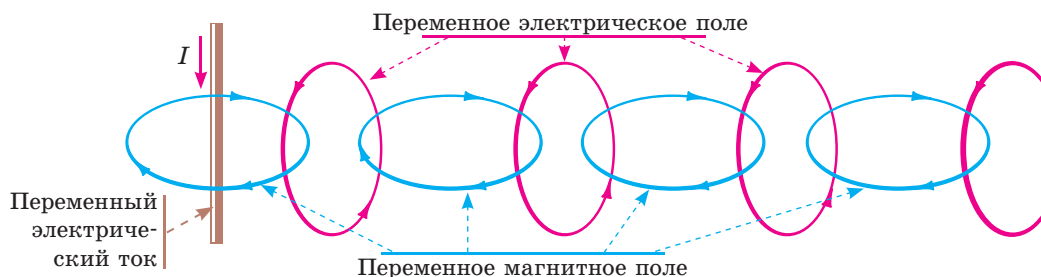
**Рис. 19.2.** В системе отсчета, связанной с мальчиком, обнаруживается только электрическая составляющая электромагнитного поля. В системе отсчета, связанной с девочкой, обнаруживаются обе составляющие — и электрическая, и магнитная



**Рис. 19.3.** К вопросу в § 19



**Рис. 19.4.** Переменный ток — это ток, сила которого периодически изменяется: со временем значение силы тока то увеличивается, то уменьшается; изменяется и направление тока



**Рис. 19.5.** Схематическое изображение механизма распространения электромагнитной волны

электромагнитные волны «путешествуют» во Вселенной почти с начала ее существования!

По теории Максвелла, *источником электромагнитной волны может быть любая заряженная частица, движущаяся с ускорением* (то есть частица, которая все время изменяет скорость своего движения или по значению, или по направлению, или одновременно и по значению, и по направлению). Если же частица неподвижна или движется с неизменной скоростью, вблизи этой частицы существует электромагнитное поле, однако электромагнитную волну она не излучает.

Излучением электромагнитных волн сопровождаются и некоторые процессы, происходящие внутри молекул, атомов, ядер атомов (теория таких процессов — *квантовая теория* — была создана в XX в.).

### 3

#### Характеризуем электромагнитную волну

Электромагнитная волна, как и механическая, характеризуется *частотой* ( $\nu$ ), *длиной* ( $\lambda$ ) и *скоростью распространения* ( $v$ ). Так же, как в случае с механическими волнами, данные величины связаны *формулой волны*:

$$v = \lambda \nu$$

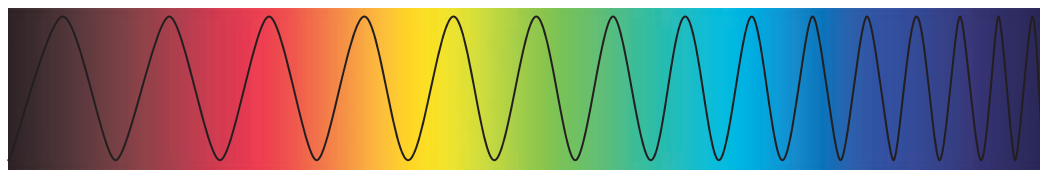
В отличие от механических волн, для распространения электромагнитных волн среда не нужна. Наоборот, лучше и быстрее всего электромагнитные волны распространяются в вакууме. Дж. Максвелл теоретически вычислил *скорость распространения электромагнитной волны в вакууме* и с удивлением обнаружил, что полученное значение совпадает со значением скорости света в вакууме (к тому времени оно уже было измерено экспериментально):

$$v = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Дж. Максвелл выдвинул правильное и смелое на то время предположение: *свет является разновидностью электромагнитных волн* (рис. 19.6). Ученый не только установил природу света, но и предугадал существование и свойства разных видов электромагнитных волн.

*В вакууме — и только в нем — все электромагнитные волны распространяются с одинаковой скоростью (c), поэтому для вакуума длина и частота электромагнитной волны связаны формулой:*

$$c = \lambda \nu$$



**Рис. 19.6.** Свет — это электромагнитные волны. Частота этих волн изменяется примерно от  $4 \cdot 10^{14}$  Гц (красный цвет) до  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц (фиолетовый цвет)

При переходе из одной среды в другую скорость распространения электромагнитной волны изменяется, изменяется и длина волны, а вот частота остается неизменной. *В воздухе скорость распространения электромагнитных волн почти такая же, как в вакууме.*

Теория электромагнитного поля Максвелла была подтверждена экспериментально через 15 лет после создания: Генрих Герц (рис. 19.7) продемонстрировал излучение и прием электромагнитных волн. Получив электромагнитные волны, Г. Герц изучил их свойства. Он, в частности, установил, что электромагнитные волны:

- *отражаются от проводящих предметов* (угол отражения равен углу падения);
- *преломляются на границе с диэлектриком;*
- *частично поглощаются веществом и частично рассеиваются им.*

Все эти явления обусловлены действием электромагнитного поля на заряженные частицы в веществе. Так, если электромагнитная волна падает на поверхность металла, то на свободные электроны действует переменное электрическое поле (электрическая составляющая электромагнитной волны). В результате в поверхностном слое металла возникают переменные электрические токи, которые и излучают отраженную электромагнитную волну.



**Рис. 19.7.** Генрих Рудольф Герц (1857–1894) — немецкий физик, один из основателей электродинамики



### Подводим итоги

Взаимодействие заряженных тел и частиц осуществляется при помощи электромагнитного поля. Электромагнитное поле имеет две составляющие (две формы проявления) — электрическую (электрическое поле) и магнитную (магнитное поле): изменяющееся магнитное поле создает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле создает магнитное поле.

Распространение в пространстве переменного электромагнитного поля называют электромагнитной волной. Скорость распространения волны, ее длина и частота связаны формулой волны:  $v = \lambda \nu$ . Лучше и быстрее всего электромагнитные волны распространяются в вакууме. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме одинакова для любых электромагнитных волн и равна скорости света:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Свет тоже является электромагнитной волной. Для вакуума формула волны имеет вид:  $c = \lambda \nu$ .





### Контрольные вопросы

**1.** В чем заключается гипотеза Дж. Максвелла? **2.** Дайте определение электромагнитного поля, назовите его составляющие. **3.** Приведите примеры подтверждающие относительность электрического и магнитного полей. **4.** Как образуется электромагнитная волна? Какие объекты могут ее излучать? **5.** Какие физические величины характеризуют электромагнитную волну? Как они связаны? **6.** Какие свойства электромагнитных волн установил Г. Герц?



### Упражнение № 19

- Выберите правильные ответы из предложенных.  
Электромагнит подъемного крана работает от постоянного тока. Определите:  
1) когда электромагнит создает для оператора крана и электрическое, и магнитное поля;  
2) когда электромагнит излучает электромагнитные волны.  
а) в момент замыкания цепи; б) в момент размыкания цепи; в) когда электромагнит, двигаясь равномерно, переносит груз; г) когда неподвижный электромагнит держит груз.
- Дополните таблицу, считая, что волны распространяются в воздухе.

Источник волны	Длина	Частота	Скорость
Провод линии электропередачи		50 Гц	
Радиопередатчик	10 см		
Инфракрасный излучатель	1,5 мкм		

- По данным рис. 19.6 определите длины электромагнитных волн для фиолетового и красного света. Рассмотрите два случая: свет распространяется а) в вакууме; б) в стекле (показатель преломления стекла для красного света равен 1,64, для фиолетового света — 1,67).
- Воспользовавшись дополнительными источниками информации, узнайте об изобретении радио. Сделайте краткое сообщение.
- Лодка качается в открытом море. Волны распространяются со скоростью 12 м/с; длина волны — 24 м. Какова частота ударов волн о корпус лодки? Каково время между ударами?



## § 20. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Удобная мобильная связь, яркий солнечный свет, вредное радиоактивное излучение, полезный в небольших дозах ультрафиолет, ласковое тепло печи, «видящие насквозь» рентгеновские лучи... Все это — электромагнитные волны, они имеют общую природу и распространяются в вакууме с одинаковой скоростью. Почему же их свойства такие разные? Имеют ли они какое-то принципиальное отличие? Как образуются разные виды электромагнитных волн и где их применяют? Попробуем разобраться.

### 1

#### Рассматриваем шкалу электромагнитных волн

Разные виды электромагнитных волн прежде всего отличаются частотой, а следовательно, длиной волны. Именно разные частоты — причина существенных отличий в некоторых свойствах электромагнитных волн.

Если расположить все известные электромагнитные волны в порядке увеличения их частоты (рис. 20.1), увидим, что частоты могут отличаться более чем в  $10^{16}$  раз! Согласитесь, это огромная разница. И поэтому нетрудно представить, насколько разными могут быть свойства электромагнитных волн.

**Шкала электромагнитных волн** на рис. 20.1 разделена на участки, соответствующие разным диапазонам длин и частот электромагнитных волн, то есть разным видам электромагнитных волн. У волн одного диапазона одинаковый способ излучения и похожие свойства.

**Радиоволны** — от сверхдлинных с длиной более 10 км до ультракоротких и микроволн с длиной менее 0,1 мм — создаются переменным электрическим током.

**Электромагнитные волны оптического диапазона** излучаются возбужденными атомами. В данном диапазоне различают:

- *инфракрасное (тепловое) излучение* (длина волны — от 780 нм до 1–2 мм);
- *видимый свет* (длина волны — 400–780 нм);
- *ультрафиолетовое излучение* (длина волны — 10–400 нм).

**Рентгеновское излучение** (длина волны — 0,01–10 нм) возникает вследствие быстрого (ударного) торможения электронов, а также в результате процессов внутри электронных оболочек атомов.

**$\gamma$ -излучение** (длина волны менее 0,05 нм) испускается возбужденными атомными ядрами во время ядерных реакций, радиоактивных преобразований атомных ядер и преобразований элементарных частиц.

❓ Рассмотрите шкалу электромагнитных волн (см. рис. 20.1). Почему, по вашему мнению, некоторые ее участки отнесены к двум разным видам электромагнитных волн?



**Рис. 20.1.** Шкала (спектр) электромагнитных волн — непрерывная последовательность частот и длин существующих в природе электромагнитных волн



**Рис. 20.2.** Микроволновая печь — устройство, в котором используют радиоволны высокой частоты (обычно  $2,45 \cdot 10^9$  Гц)

Из всего спектра наиболее естественным для организма человека является *инфракрасное излучение*. Волны, имеющие длины приблизительно 7–14 мкм, по частоте близки излучению человеческого тела и оказывают на организм человека чрезвычайно полезное воздействие. Самый известный естественный источник таких волн на Земле — это Солнце, а самый известный искусственный — дровяная печь, и каждый человек обязательно ощущал на себе их благотворное влияние.



## 2 Используем радиоволны

В технике наиболее часто используются электромагнитные волны *радиодиапазона*. Их применяют в мобильной связи, радиовещании, телевидении, для обнаружения и распознавания различных объектов (радиолокация), определения местонахождения объектов (GPS-навигация, GPS-мониторинг и др.), для связи с космическими аппаратами и т. д. (рис. 20.2).

Радиоволны сделали жизнь человека намного комфортнее. Однако они влияют на общее состояние людей и животных, при этом чем короче волны, тем сильнее реагируют на них организмы.

Мощные электромагнитные волны негативно воздействуют на человека. Медики утверждают, что сотовый телефон — опасный источник электромагнитного излучения, тем более что он часто находится вблизи мозга и глаз человека. Поглощаясь тканями головного мозга, зрительными и слуховыми анализаторами, волны передают им энергию. Со временем это может привести к нарушениям нервной, эндокринной и сердечно-сосудистой систем.

## 3 Изучаем инфракрасное излучение

Между радиоволнами и видимым светом расположен участок *инфракрасного (теплого) излучения*. В промышленности это излучение используют для сушки лакокрасочных поверхностей, древесины, зерна и др. Инфракрасные лучи применяются в пультах дистанционного управления, системах автоматики, охранных системах и т. п. Эти лучи невидимые и не отвлекают внимания человека. Но существуют приборы, которые могут ощущать и преобразовывать невидимое инфракрасное изображение в видимое. Так работают тепловизоры — приборы ночного видения, «улавливающие» инфракрасные волны длиной 3–15 мкм. Такие волны излучают тела, которые имеют температуру от  $-50$  до  $500$  °С.

Интересно, что многие представители фауны обладают своеобразными «приборами ночного видения», способными воспринимать инфракрасные лучи (рис. 20.3, 20.4).

#### 4 Узнаём об ультрафиолетовом излучении

*Ультрафиолетовое излучение*, в отличие от видимого света и инфракрасного излучения, имеет высокую химическую активность, поэтому его применяют для дезинфекции воздуха в больницах и местах большого скопления людей.

Основной источник естественного ультрафиолетового излучения — Солнце. Атмосфера Земли частично задерживает ультрафиолетовые волны: те, что короче 290 нм (жесткий ультрафиолет), задерживаются в верхних слоях атмосферы озоном, а волны длиной 290–400 нм (мягкий ультрафиолет) поглощаются углекислым газом, водяным паром и тем же озоном.

В больших дозах ультрафиолетовое излучение вредно для здоровья человека (рис. 20.5). Чтобы снизить вероятность солнечного ожога и заболеваний кожи, врачи рекомендуют не находиться летом на солнце между 10 и 13 часами, когда солнечное излучение наиболее интенсивно. Однако в небольших количествах ультрафиолет положительно влияет на человека, так как способствует выработке витамина D, укрепляет иммунную систему, стимулирует ряд важных жизненных функций.

#### 5 Рентгеновское и $\gamma$ -излучение

Чаще всего рентгеновское излучение используют в медицине, ведь оно имеет свойство проходить сквозь непрозрачные предметы (например, тело человека). Костные ткани менее прозрачны для рентгеновского излучения, чем другие ткани организма, поэтому кости четко видны на рентгенограмме. Рентгеновскую съемку используют также в промышленности (для выявления дефектов), химии (для анализа соединений), физике (для исследования структуры кристаллов).

Рентгеновское излучение оказывает разрушительное воздействие на клетки организма, поэтому применять его следует чрезвычайно осторожно.

$\gamma$ -излучение, которое имеет еще большую проникающую способность, используют в дефектоскопии (для выявления дефектов внутри деталей), сельском хозяйстве и пищевой



**Рис. 20.3.** Глубоководные кальмары кроме обычных глаз имеют еще термоскопические — они расположены на хвосте и улавливают инфракрасные лучи



**Рис. 20.4.** Американская гремучая змея имеет сверхчувствительный термолокатор, расположенный в лицевой ямке между глазами



**Рис. 20.5.** Ультрафиолетовое излучение особо опасно для сетчатки глаза, поэтому высоко в горах, где ультрафиолетовые лучи меньше всего поглощаются атмосферой, нужно обязательно защищать глаза

промышленности (для стерилизации продуктов). На организм человека  $\gamma$ -излучение оказывает негативное влияние, в то же время четко направленное и дозированное  $\gamma$ -излучение применяют при лечении онкологических заболеваний — для уничтожения раковых клеток (лучевая терапия).



### Подводим итоги

Спектр (шкала) электромагнитных волн — непрерывная последовательность частот и длин электромагнитных волн, существующих в природе.

По способу излучения различают радиоволны (создаются переменным электрическим током); электромагнитные волны оптического диапазона (инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение — испускаются возбужденными атомами); рентгеновское излучение (возникает при быстром торможении электронов);  $\gamma$ -излучение (испускается возбужденными атомными ядрами). Электромагнитные волны разных диапазонов имеют разные свойства, поэтому не одинаково влияют на человека и применяются в разных областях.

Все виды электромагнитных волн распространяются в вакууме с одинаковой скоростью. С увеличением частоты волны (с уменьшением ее длины) увеличиваются проникающая способность и химическая активность электромагнитного излучения.



### Контрольные вопросы

**1.** Назовите известные вам виды электромагнитных волн. **2.** Что общего между всеми видами электромагнитных волн? В чем их отличие? **3.** Как изменяются свойства электромагнитных волн с увеличением их частоты? **4.** Приведите примеры применения разных видов электромагнитных волн. **5.** Как избежать негативного влияния некоторых видов электромагнитного излучения?



### Упражнение № 20

**1.** Расположите электромагнитные волны в порядке увеличения их длины: 1) видимый свет; 2) ультрафиолетовое излучение; 3) радиоволны; 4) рентгеновское излучение.

**2.** Установите соответствие между излучателем и электромагнитными волнами, которые он в основном излучает.

1 Мобильный телефон	А $\gamma$ -излучение
2 Батарея отопления	Б Рентгеновское излучение
3 Светлячок	В Инфракрасное излучение
4 Радиоактивный препарат	Г Видимый свет
	Д Радиоволны

**3.** Длина волны желтого света в вакууме — 570 нм. Определите частоту волны.

**4.** Какова длина электромагнитной волны в вакууме, если ее частота равна  $3 \cdot 10^{12}$  Гц? К какому диапазону относится эта волна?

**5.** Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте историю изобретения какого-либо устройства, действие которого основано на электромагнитном излучении.



**6.** Расстояние до препятствия, отражающего звук, равно 68 м. Через какое время человек услышит эхо, если звуковая волна распространяется в воздухе?



## § 21. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ. РАДИОЛОКАЦИЯ

Обратившись к шкале электромагнитных волн (см. рис. 20.1), увидим, что наибольший ее участок принадлежит радиоволнам. Так как частоты этих волн существенно отличаются, то отличаются и свойства волн. Подробнее о радиоволнах вы узнаете в старшей школе, а сейчас остановимся на применении *ультракоротких радиоволн* (длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров).

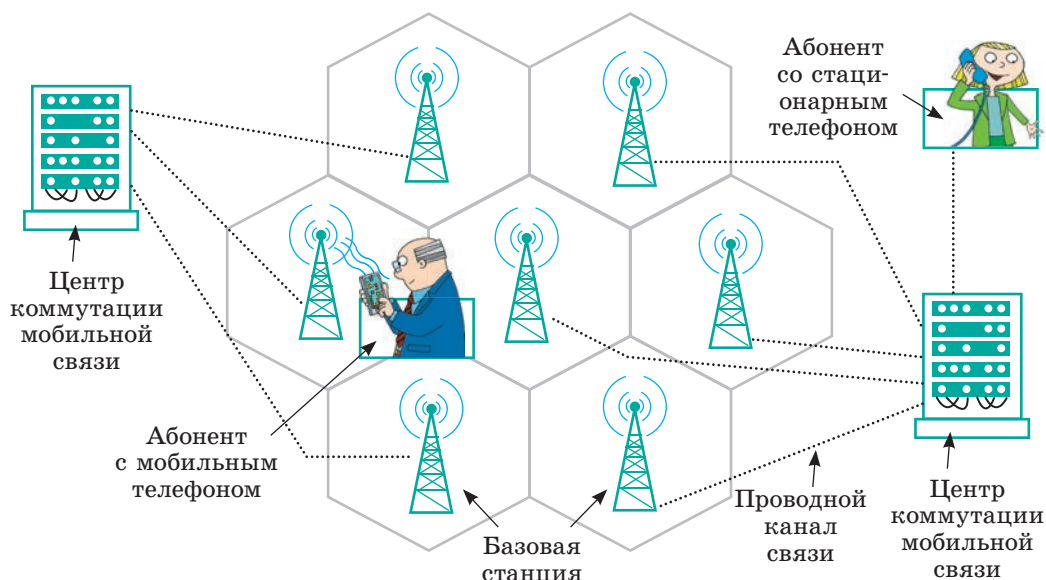
### 1 Изучаем особенности распространения ультракоротких радиоволн

По своим свойствам ультракороткие радиоволны очень близки к световым лучам: они распространяются в пределах прямой видимости, их можно посылать узкими пучками. Именно эти свойства обеспечили широкое применение ультракоротких радиоволн в радиолокации, беспроводной связи, спутниковом телевидении. Узкий луч меньше рассеивается (что позволяет применять менее мощные передатчики), его проще принимать.

### 2 Узнаём, почему мобильную радиосвязь называют сотовой

**Сотовая связь** — один из видов мобильной радиосвязи, в основе которого лежит сотовая сеть.

Для сотовой связи используют электромагнитные волны частотой от 450 до 3000 МГц. Главная особенность такой связи заключается в том, что общая зона покрытия делится на небольшие участки — *соты* (их так называют, поскольку они имеют форму шестиугольника). Каждая ячейка сот имеет площадь около 25 км<sup>2</sup> и обслуживается отдельной базовой станцией. Соты, частично перекрываясь, образуют сеть (рис. 21.1).



**Рис. 21.1.** Основные составляющие сотовой сети: сотовые телефоны, базовые станции, центры коммутации

Каждый из вас умеет пользоваться мобильным телефоном. А как он осуществляет связь?

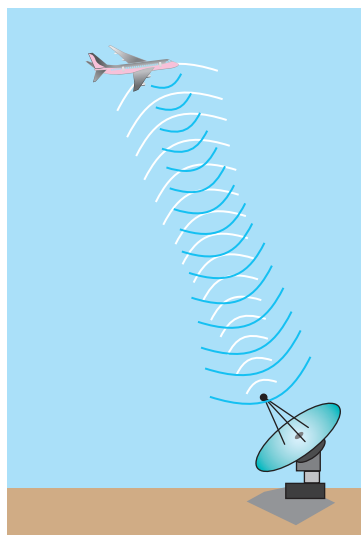
Когда вы включаете телефон, он начинает «прослушивать» эфир и улавливает сигнал *базовой станции* той ячейки, где вы на данный момент находитесь. После этого телефон излучает радиосигнал — посылает станции свой идентификационный код. С этого момента телефон и станция будут поддерживать радиокontakt, периодически обмениваясь сигналами.

Но вы не всегда находитесь в одном месте, и, если в какой-то момент окажетесь в другой ячейке, ваш телефон наладит связь с базовой станцией этой ячейки. Ячейки частично перекрываются, поэтому вы даже не заметите, что вас начала обслуживать другая станция. А вот если телефон не сможет найти ближайшую станцию и передать ей свой код, связь прервется и на дисплее появится информация об отсутствии сети.

Описанными процессами «руководят» *центры коммутации*, которые связаны с базовыми станциями проводными каналами связи. По сути центр коммутации непрерывно «отслеживает» месторасположение вашего мобильного телефона. Он «передает» вас, как эстафетную палочку, от одной базовой станции к другой, когда вы «путешествуете» из ячейки в ячейку. Именно через центры коммутации осуществляется выход на другие сети: вы можете позвонить товарищу, телефон которого обслуживается другим оператором, сделать звонок на стационарный телефон, воспользоваться Интернетом и т. д.

### 3 Изучаем радиолокацию

Свойство радиоволн отражаться от металлов установил Г. Герц. Со временем выяснили, что электромагнитные волны отражаются от любых тел, и чем лучше тело проводит электрический ток, тем больше энергия отраженной волны. *На отражении радиоволн основана радиолокация.*



**Рис. 21.2.** Принцип работы радиолокатора

**Радиолокация** — способ обнаружения, распознавания и определения местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиолокационная установка — **радиолокатор (радар)** — обеспечивает излучение радиоволн, а также прием радиоволн, отраженных от объекта (рис. 21.2).

Если радиоволны излучать во всех направлениях или широким пучком, они будут отражаться одновременно от многих тел и выяснить, где находится интересующий объект, например самолет, будет невозможно. Поэтому радиолокатор посылает волны *направленно и узким пучком*, а обнаружение отраженного сигнала свидетельствует, что объект находится в направлении распространения радиоволн (рис. 21.3).

Различают два основных режима работы радиолокатора. *В режиме поиска (сканирования)*

антенна радиолокатора все время сканирует пространство (например, поворачивается по горизонтали и одновременно движется вниз-вверх). В режиме наблюдения антенна все время направлена на выбранный объект.

#### 4 Выясняем, как работает радиолокатор

Радиосигнал, посылаемый радиолокатором, представляет собой короткий (продолжительностью миллионные доли секунды), но очень мощный импульс. Как только импульс послан, антенна радиолокатора автоматически переключается на прием: радиолокатор «слушает» эфир — ждет отраженного сигнала. У приемника высокая чувствительность (отраженный радиосигнал довольно слаб), поэтому на время излучения импульса приемник отключают, иначе аппаратура испортится.

Через определенный интервал времени (значительно больший, чем продолжительность импульса) антенна снова переключается на радиопередатчик, а радиолокатор посылает следующий импульс.

Расстояние  $s$  до объекта определяют по времени  $t$  прохождения радиоимпульса до цели и обратно. Скорость распространения электромагнитных волн в воздухе практически равна скорости распространения света в вакууме ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), поэтому:

$$s = \frac{ct}{2}$$

Интервал времени  $t$  очень мал. Так, если расстояние до объекта равно 120 км, то отраженный радиосигнал вернется через 0,8 мс ( $t = 2s/c$ ).

#### 5 Применяем радиолокацию

Радиолокаторы создавались исключительно в военных целях — для обнаружения самолетов противника (рис. 21.4). Со временем радиолокацию стали применять в других областях. Сейчас все *воздушные, морские и океанские суда* оснащены радиолокаторами — они помогают найти свободные проходы между облаками или айсбергами, в плохую погоду избежать столкновения с другими судами, уточнить курс и т. д. (рис. 21.5).



**Рис. 21.3.** Излучение узкого направленного пучка ультракоротких радиоволн и прием отраженного сигнала обеспечивает параболическая антенна радиолокатора



**Рис. 21.4.** Современный «летающий радар» может обнаружить самолет противника на расстоянии 540 км



**Рис. 21.5.** Радар современного морского судна

Радиолокационные станции в аэропортах помогают совершить посадку воздушным судам, а станции, установленные вдоль побережья, обеспечивают безопасный вход кораблей в порт.

Радиолокацию применяют *в научных исследованиях, метрологии, сельском и лесном хозяйстве*. Она помогает составить карты рельефа земной поверхности, исследовать плотность растительного покрова, обнаружить лесной пожар, определить состав почвы и т. д.

Важное значение имеет радиолокация *в космических исследованиях*. Запуски и посадки космических аппаратов невозможны без использования радиолокаторов. С помощью радиолокации были уточнены расстояния до Луны, Венеры, Марса. Радиолокаторы, установленные на искусственных спутниках Венеры, помогли проникнуть сквозь толщу облаков этой планеты и определить ее рельеф.



### Подводим итоги

Сейчас особенно широко используют волны ультракороткого диапазона: с помощью специальных антенн их можно направить узким пучком, который меньше рассеивается, что позволяет использовать менее мощные передатчики; ультракороткие радиоволны применяют в сотовой связи, спутниковом телевидении, радиолокации. Сотовая связь — один из видов мобильной радиосвязи, в основе которого лежит сотовая сеть.

Радиолокация — обнаружение, распознавание и определение местонахождения объектов с помощью радиоволн. Радиолокатор создает узкий направленный пучок радиоволн и принимает радиоволны, отраженные от объектов. Расстояние до объекта определяют по времени прохождения радиопульса до объекта и обратно:  $s = ct / 2$ .



### Контрольные вопросы

**1.** В чем состоит основное преимущество ультракоротких радиоволн? **2.** Что такое сотовая связь? Как она организована? **3.** Что такое радиолокация? На чем она основана? **4.** Опишите принцип работы радиолокатора. **5.** Как с помощью радиолокации определяют местонахождение объекта (расстояние до объекта, направление, в котором он расположен)? **6.** Где применяют радиолокацию?



### Упражнение № 21

1. На каком расстоянии обнаружен объект, если отраженный сигнал вернулся через 20 мкс после отправления?
2. Радиолокатор работает на частоте  $6 \cdot 10^8$  Гц. Радиоволну какой длины он излучает?
3. Особенности ультракоротких радиоволн (практически не отражаются от ионосферы, их можно направить узким пучком) обеспечили их широкое применение. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, как организованы спутниковое телевидение и спутниковая связь.
4. Применение радиолокационных станций для обнаружения военных машин (самолетов, кораблей) послужило причиной активного поиска способов «спрятать» военную технику. Так появилась *стелс-технология*. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, удалось ли хотя бы частично «спрятать» военные машины. Если удалось, то как?



## Дистанционное зондирование Земли

*Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)* — это наблюдение и изучение поверхности нашей планеты с помощью приборов, расположенных на большой высоте (например, на спутниках или самолетах). Где используют ДЗЗ?

С технической точки зрения, самая простая область применения ДЗЗ — прогноз погоды. На этом примере и выясним, как работает система.

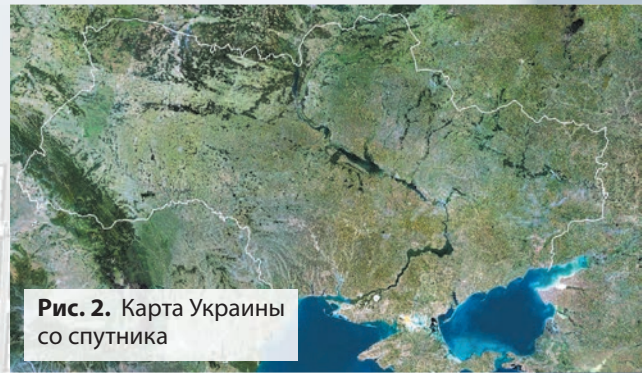
Обычно телевизионные прогнозы погоды сопровождаются снимками из космоса (рис. 1). Однако яркие картинки на телеэкране — это, конечно, не все, что нужно для прогноза погоды!



**Рис. 1.** Телевизионный прогноз погоды с использованием спутниковых снимков

Спутник не может сфотографировать всю поверхность Земли сразу. Как фары автомобиля освещают только дорогу, оставляя обочины в темноте, так и спутник, облетая вокруг Земли, «видит» только определенную полосу. Ширина этой полосы может колебаться от 7 до 1500 км и зависит от необходимой точности исследования: чем детальнее получаемая информация, тем уже полоса. Во время следующего оборота спутник «осматривает» сопредельную полосу и т. д. Если объединить полученные данные от нескольких таких полос, можно получить «картинку» для большой территории, например для всей Украины (рис. 2).

Спутник передает полученную информацию на приемные антенны;



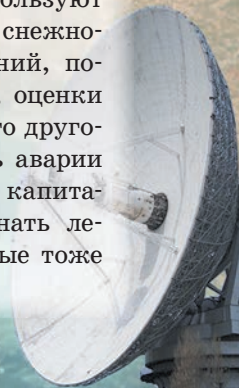
**Рис. 2.** Карта Украины со спутника

информацию обрабатывают и преобразуют в обычные фотографии. Затем информация передается метеорологам, которые объединяют данные из космоса с результатами наземных наблюдений и на основе сложных математических моделей прогнозируют температуру и состояние атмосферы на день, неделю, месяц...

Для анализа состояния поверхности Земли используют целую «армию» спутников. Большинство из них получают данные в диапазоне видимых глазу электромагнитных волн, но есть и такие, которые зондируют поверхность электромагнитными пучками в диапазоне сантиметровых радиоволн (СВЧ-излучение), а также радиоволн большей длины (свыше 1 м).

Получением и обработкой данных со спутников занимаются разные организации; в нашей стране их работу координирует *Государственное космическое агентство Украины*.

Данные из космоса используют также для анализа состояния снежного покрова, прогноза наводнений, пожаров, засухи, землетрясений, оценки будущих урожаев и для многого другого. Например, чтобы избежать аварии при столкновении со льдами, капитанам кораблей очень важно знать ледовую обстановку. Такие данные тоже получают из космоса.





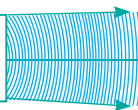
## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА III «Механические и электромагнитные волны»

1. Вы узнали о существовании *механических волн* и их *видах*.

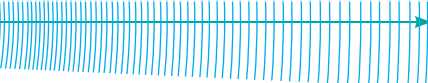
### МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

**Механическая волна** — распространение колебаний в упругой среде.

Источник волны —  
колеблющееся тело

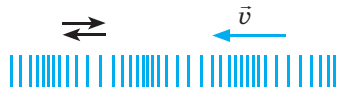


Перенос энергии без переноса вещества



#### Продольные

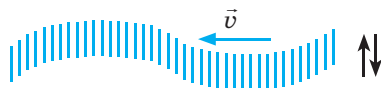
Частицы колеблются вдоль направления распространения волны



Сжатие и растяжение среды

#### Поперечные

Частицы колеблются перпендикулярно направлению распространения волны



Относительное смещение слоев среды

2. Вы узнали о *физических величинах, характеризующих механические волны*, и установили соотношения между ними.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Частота волны

$$[\nu] = 1 \text{ Гц}$$

Равна частоте колебаний источника волны

Скорость распространения волны

$$[v] = 1 \text{ м/с}$$

Изменяется при переходе из одной среды в другую

Длина волны

$$[\lambda] = 1 \text{ м}$$

$$\text{Формула волны: } v = \lambda \nu$$

3. Вы ознакомились со звуковыми волнами и выяснили, что *звуковые волны* — это *механические волны определенной частоты*.

### ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

**Инfrasound**  
(1 мГц — 20 Гц)

Оказывает негативное воздействие на здоровье человека

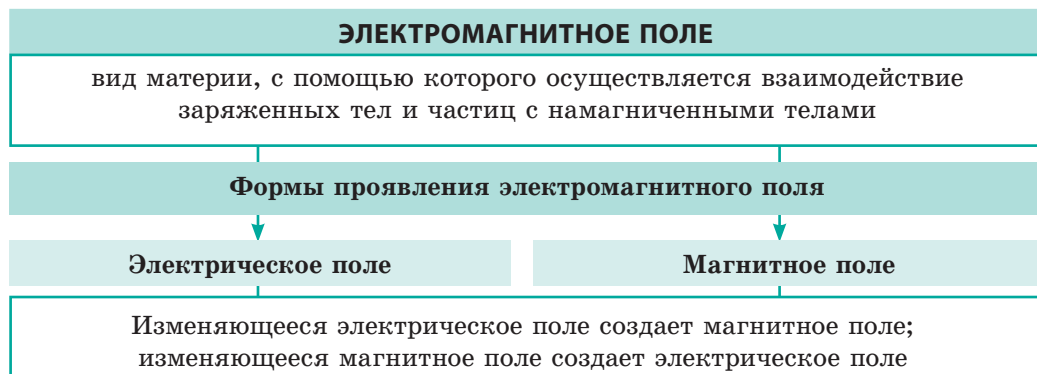
**Слышимый звук**  
(20 Гц — 20 кГц)

Высота звука определяется частотой звуковой волны;  
**громкость** — амплитудой

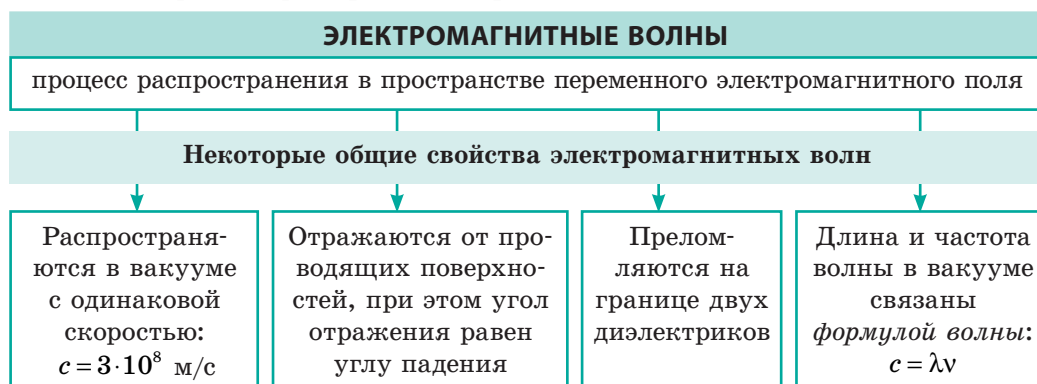
**Ультразвук**  
(свыше 20 кГц)

Используют в медицине, дефектоскопии, эхолокации

4. Вы узнали, что теоретические исследования *Дж. Максвелла* и многочисленные эксперименты доказали неразрывную *связь между электрическими и магнитными полями*. Эти поля образуют *единое электромагнитное поле*.



5. Вы узнали, что в природе существуют *электромагнитные волны*, ознакомились со свойствами электромагнитных волн *разных диапазонов* и некоторыми примерами их применения.



*Увеличивается частота, уменьшается длина электромагнитной волны* →

Радиоволны	Оптический диапазон			Рентгеновское излучение	γ-излучение
	инфракрасное излучение	видимый свет	ультрафиолетовое излучение		

→ *Увеличивается проникающая способность, усиливается химическая активность*

6. Вы узнали, что на свойствах *ультракоротких радиоволн* распространяться узким пучком и отражаться от препятствий основана **радиолокация** — обнаружение, распознавание и определение местонахождения объектов с помощью радиоволн. Расстояние  $s$  до объекта определяют по времени  $t$  прохождения радиоимпульса до объекта и обратно:

$$s = \frac{ct}{2}$$

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ III «Механические и электромагнитные волны»

*Задания 1–8 содержат только один правильный ответ.*

1. (1 балл) На каком свойстве механических волн основана эхолокация?
  - а) перенос энергии без переноса вещества;
  - б) отражение волны;
  - в) зависимость длины волны от среды, в которой распространяется волна;
  - г) уменьшение амплитуды волны с увеличением расстояния от источника волны.
2. (1 балл) В какой среде распространяются поперечные механические волны?
  - а) в жидкости;
  - б) в вакууме;
  - в) в любой среде;
  - г) в твердом теле.
3. (1 балл) Какое утверждение ошибочно?
  - а) Продольные волны не распространяются в твердых телах.
  - б) Механические волны не распространяются в вакууме.
  - в) Свет — это электромагнитная волна.
  - г) Звук — это механическая волна.
4. (1 балл) Какой объект может быть источником механической волны?
  - а) заряженная частица, движущаяся с ускорением;
  - б) колеблющееся тело;
  - в) тело, движущееся равномерно;
  - г) неподвижное намагниченное тело.
5. (1 балл) Постоянный магнит лежит на сиденье трамвая, который движется равномерно прямолинейно. Относительно кого из наблюдателей существует только магнитная составляющая электромагнитного поля?
  - а) кондуктор, идущий по проходу;
  - б) пассажир встречного автомобиля;
  - в) пешеход, стоящий на обочине дороги;
  - г) водитель автобуса, движущегося за трамваем с такой же скоростью.
6. (2 балла) При переходе волны из одной среды в другую не изменяется:
  - а) амплитуда волны;
  - б) длина волны;
  - в) частота волны;
  - г) скорость распространения волны.
7. (2 балла) Какое природное явление не сопровождается появлением механических волн?
  - а) радуга;
  - б) молния;
  - в) землетрясение;
  - г) ветер.
8. (2 балла) На расстоянии 170 м от небоскреба стоит человек. Из его рук на тротуар падает металлический предмет. Через какое время после удара человек может услышать эхо?
  - а) 0,5 с;
  - б) 1 с;
  - в) 2 с;
  - г) 4 с.
9. (2 балла) На каком расстоянии расположен объект, если отраженный от него радиосигнал вернулся через 2 мкс после излучения?

10. (3 балла) Установите соответствие между приемником и видом электромагнитных волн, которые он преимущественно принимает.
- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1 Прибор ночного видения | А $\gamma$ -излучение    |
| 2 Спутниковая антенна    | Б Радиоволны             |
| 3 Глаз человека          | В Инфракрасное излучение |
|                          | Г Видимый свет           |
11. (3 балла) По натянутому шнуру распространяется волна (рис. 1). В каком направлении движется точка А в зафиксированный на рисунке момент времени?
12. (3 балла) Скорость движения пули равна 680 м/с. На сколько раньше пуля попадет в мишень, расположенную на расстоянии 1360 м, чем до мишени долетит звук выстрела?
13. (3 балла) Рабочая пчела, которая летит за взятком, делает в среднем 180 взмахов крыльями в секунду. А когда эта же пчела возвращается в улей, количество взмахов крыльями в секунду возрастает до 280. Как это отражается на звуке, который мы слышим?
14. (4 балла) Какова длина звуковой волны в воздухе, если источник звука осуществляет 5100 колебаний в минуту? Какова длина этой волны в воде?
15. (4 балла) По графику колебаний источника механической волны (рис. 2) определите частоту и длину волны, если она распространяется со скоростью 20 м/с.
16. (4 балла) Радиоволны длиной 6 м переходят из вакуума в среду, где скорость их распространения в 1,5 раза меньше, чем в вакууме. Определите частоту и длину радиоволн.

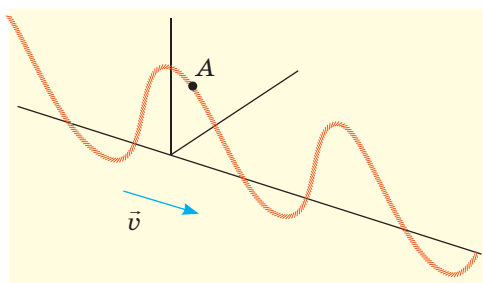


Рис. 1

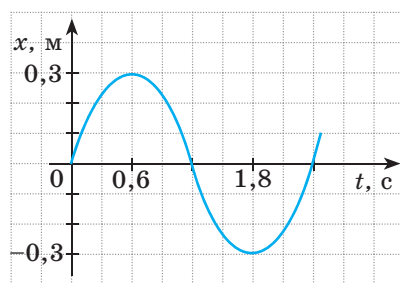


Рис. 2

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, и подсчитайте сумму баллов. Затем эту сумму разделите на три. Полученный результат будет соответствовать уровню ваших учебных достижений.



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

## Ориентировочные темы проектов

1. Звуки в жизни человека.
2. Применение инфра- и ультразвуков в технике.
3. Вибрации и шумы и их влияние на организмы.
4. Электромагнитные волны в природе и технике.
5. Воздействие электромагнитного излучения на организм человека.
6. Виды шумового загрязнения. Измерение уровня шумового загрязнения. Изучение влияния шумового загрязнения на организмы.
7. Музыкальные инструменты как источники звуковых волн.

## Темы рефератов и сообщений

1. Механизм образования волн на поверхности воды.
2. Удивительное эхо.
3. Что такое акустические резонаторы и где их применяют.
4. Эффект Допплера и его использование для контроля скорости движения транспортных средств.
5. Мужские, женские, детские голоса: как и почему они отличаются.
6. Средства защиты от шумов в мегаполисах.
7. Ультразвуковая кавитация.
8. Применение ультразвука в технике.
9. Образование инфразвука в океане.
10. Визуализация звуковых колебаний.
11. Радиоволны в нашей жизни.
12. История изобретения радио.
13. Электромагнитный смог.
14. Использование радиолокации в астрономии.
15. Эффект Допплера в астрономии, или Как доказано, что галактики разлетаются.
16. Действие ультрафиолетового излучения на организм человека.
17. В. Рентген или И. Пулюй: кто первым открыл X-лучи?
18. История изучения световых явлений.

## Темы экспериментальных исследований

1. Изготовление разных источников звука и изучение их акустических характеристик.
2. Определение зависимости высоты звука от частоты колебаний источника звуковых волн.
3. Изучение процессов отражения, преломления и наложения механических волн на поверхности воды.



# РАЗДЕЛ IV

## ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- Вы знаете, как работает тепловой двигатель, а теперь узнаете, как работает ядерный реактор
- Вы слышали, что радиация вредна, а теперь узнаете, как она лечит
- Вы знаете, что жизнь на Земле невозможна без солнечной энергии, а теперь узнаете, откуда Солнце ее «берет»
- Вы знаете, что одноименные заряды отталкиваются, а теперь узнаете, когда они притягиваются
- Вы можете рассчитать, сколько теплоты выделится при сгорании 1 кг дров, а теперь сможете вычислить количество теплоты, которое выделится при «сгорании» 1 кг урана



## § 22. СОВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА АТОМА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. ИЗОТОПЫ

История физической науки насчитывает почти 2500 лет, но только в прошлом веке физики — преподаватели и кабинетные ученые — стали консультировать руководителей государств. Количество специалистов-физиков возросло в сотни раз, были созданы огромные предприятия для производства физических приборов и оборудования (рис. 22.1). И произошло это прежде всего благодаря успехам ядерной физики, изучающей структуру и свойства атомных ядер, процессы, которые в них происходят, и механизмы преобразования атомных ядер. Из данного параграфа вы подробнее узнаете об атоме и атомном ядре.

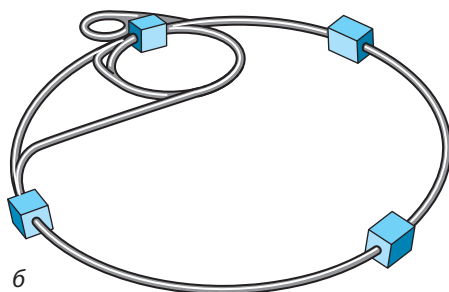
### 1 Узнаём о классическом опыте Резерфорда

Эксперименты ученых XIX в. доказали, что атом имеет сложную структуру. Было установлено, что в состав атома входят электроны, имеющие отрицательный заряд, а в целом атом нейтрален.

В 1908–1911 гг. под руководством Эрнеста Резерфорда (рис. 22.2) опытный исследователь Ганс Гейгер (1882–1945) и молодой аспирант Эрнест Марсден (1889–1970) провели серию опытов по выяснению структуры атома. Для опытов использовалось вещество, из которого с большой скоростью вылетали положительно заряженные частицы — так называемые  $\alpha$ -частицы (альфа-частицы).

Узкий пучок  $\alpha$ -частиц направлялся из свинцового контейнера на тонкую золотую фольгу, а затем попадал в экран, покрытый слоем кристаллов цинк сульфида (рис. 22.3). В месте попадания  $\alpha$ -частицы в экран происходила слабая вспышка света. Ученые наблюдали вспышки с помощью микроскопа, регистрируя попадания.

В результате опытов обнаружилось, что, как правило,  $\alpha$ -частицы проходят сквозь золотую фольгу, не изменяя направления движения, некоторые отклоняются от начальной траектории, а вот примерно одна из 20 000 частиц отскакивает от фольги, будто натываясь на препятствие (рис. 22.4).



**Рис. 22.1.** Крупнейшая на сегодня исследовательская установка — ускоритель заряженных частиц, первый запуск которого состоялся в 2008 г.: а — вид изнутри; б — схематическое изображение. Поражают размеры ускорителя: элементарные частицы разгоняются в огромном кольце длиной 26 км. Странам Европы пришлось объединить усилия, чтобы построить это чудо техники

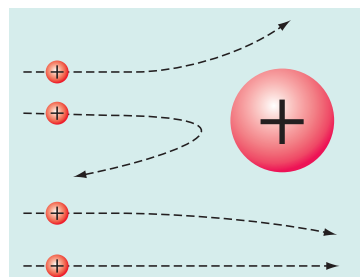
Понятно, что Э. Резерфорд не мог видеть внутреннюю структуру атома, поэтому он опирался на логику. Если положительный заряд и масса равномерно распределены по всему объему атома (именно такое представление об атоме было в то время), то все  $\alpha$ -частицы должны были пролететь сквозь фольгу практически не отклоняясь, ведь их энергия колоссальна (это примерно как бить мячом сквозь паутину).

Если же положительный заряд и масса сосредоточены в небольшом объеме внутри атома, а вокруг — «пустота», бомбардировка  $\alpha$ -частицами будет напоминать броски теннисными мячиками через поле, на котором расположена закрепленная на шесте металлическая банка. Только в ничтожно малом количестве случаев мячики попадут в банку и отскочат от нее, в остальных же случаях они пролетят мимо. Очевидно, что данное предположение больше подходит для объяснения результатов опытов.

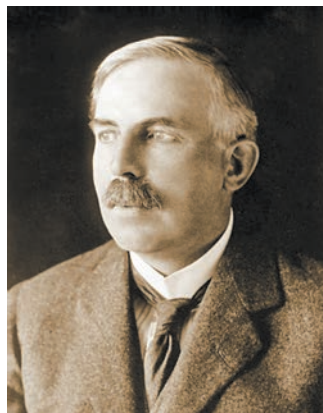
Итак, в 1911 г. Резерфорд предложил *ядерную модель строения атома*: атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженными частицами — электронами; именно в ядре сосредоточена едва ли не вся масса атома.

**?** Как вы считаете, отскочила бы  $\alpha$ -частица в опыте Резерфорда от ядра, если бы оно имело отрицательный заряд? Если бы масса ядра была намного меньше массы  $\alpha$ -частицы?

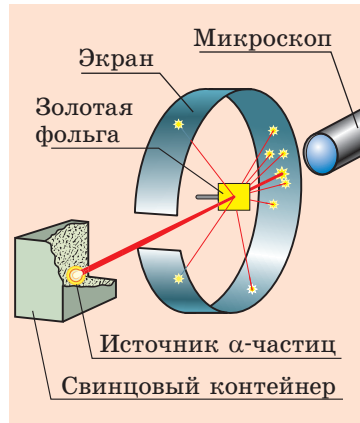
Хотя в ядре сосредоточена почти вся масса атома, размер ядра по сравнению с атомом чрезвычайно мал (диаметр атома порядка  $10^{-10}$  м, ядра —  $10^{-15}$  м). Для наглядности



**Рис. 22.4.** Траектории  $\alpha$ -частиц, пролетающих вблизи ядра Аурума. Чем ближе к ядру пролетает  $\alpha$ -частица, тем больше действующая на нее сила отталкивания и тем больше частица отклоняется от первоначальной траектории



**Рис. 22.2.** Эрнест Резерфорд (1871–1937) — выдающийся английский физик. Заложил основы учения о радиоактивности и строении атома, осуществил первую ядерную реакцию. Лауреат Нобелевской премии (1908 г.), член всех академий наук мира



**Рис. 22.3.** Схема опыта по рассеянию  $\alpha$ -частиц (опыт Резерфорда)

представьте, что атом удалось увеличить до размера большого стадиона. Разумеется, размер ядра такого атома тоже увеличится. На сколько? Вычисления показывают, что диаметр ядра атома был бы равен размеру муравья, ползущего по траве стадиона.

Ядерная модель атома, предложенная Резерфордом, была развита в работах выдающегося датского физика *Нильса Бора* (1885–1962). Именно на ядерной модели основано современное представление о строении атома (рис. 22.5).

## 2 Вспоминаем строение атомного ядра

Из курсов физики и химии вы знаете, что атомное ядро состоит из частиц двух видов: **протонов**, имеющих положительный электрический заряд, и **нейтронов**, не имеющих заряда. Масса протона примерно равна массе нейтрона и почти в 2000 раз больше массы электрона. Протоны и нейтроны, входящие в состав ядра атома, называют **нуклонами**. Суммарное количество протонов и нейтронов в атоме называют **нуклонным (массовым) числом** и обозначают символом  $A$ .

Атом является электрически нейтральным: суммарный заряд протонов в ядре равен суммарному заряду электронов, расположенных вокруг ядра. Так как заряд протона по модулю равен заряду электрона, то понятно, что *в атоме число протонов равно числу электронов*.

Число протонов в ядре называют **зарядовым (протонным) числом** и обозначают символом  $Z$ . Порядковый номер элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева соответствует *числу протонов в ядре* (зарядовому числу).

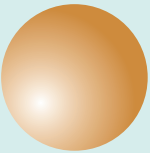
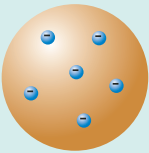
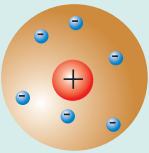
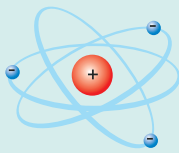
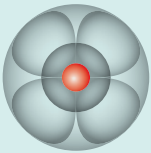
1803	1904	1911	1913	1926
				
<i>Джон Дальтон</i>	<i>Джозеф Томсон</i>	<i>Эрнест Резерфорд</i>	<i>Нильс Бор</i>	<i>Современная модель атома</i>
Атом — это неделимая составляющая химического элемента	Атом представляет собой положительно заряженный шар, в который «вкраплены» электроны (модель «пудинга с изюмом»)	Внутри атома расположено положительно заряженное ядро, содержащее почти всю массу атома; ядро окружено электронами, вращающимися вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца (планетарная модель атома)	Электроны вращаются вокруг ядра по определенным стационарным орбитам	Каждый электрон в атоме наиболее вероятно можно обнаружить в определенной области вокруг ядра; форма такой области определяется энергией электрона

Рис. 22.5. «Эволюция» модели атома

Зная зарядовое ( $Z$ ) и нуклонное ( $A$ ) числа ядра атома, можно определить количество нейтронов ( $N$ ) в данном ядре:  $N = A - Z$ .

Вид атомов, который характеризуется определенным значением зарядового числа и определенным значением массового числа, называют **нуклидом** (рис. 22.6).

? Сколько протонов и нейтронов содержит ядро нуклида Алюминия ( $^{27}_{13}\text{Al}$ )?

Если разные нуклиды имеют одинаковое зарядовое число, то их химические свойства одинаковы — нуклиды принадлежат одному химическому элементу.

Разновидности атомов одного и того же химического элемента, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называют **изотопами** («одинаковые по месту»).

Каждый химический элемент имеет несколько *изотопов* (рис. 22.7).

### 3 Узнаём о сильном взаимодействии

Электроны, имея отрицательный заряд, удерживаются вокруг положительного ядра благодаря электромагнитному взаимодействию. Но как в составе одного ядра и на очень близком расстоянии друг от друга удерживаются протоны, ведь одноименно заряженные частицы отталкиваются?

Оказывается, что все частицы в ядре притягиваются друг к другу благодаря взаимодействию, которое *в сотни раз* сильнее, чем электромагнитное отталкивание протонов (рис. 22.8). Именно поэтому взаимодействие нуклонов называют **сильным взаимодействием**.

Силы, которые действуют между протонами и нейтронами в ядре и обеспечивают существование атомных ядер, называют **ядерными силами**.

**Основные свойства ядерных сил:**

1) являются только силами притяжения;

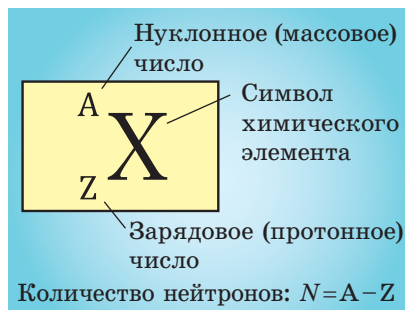


Рис. 22.6. Обозначение нуклида химического элемента

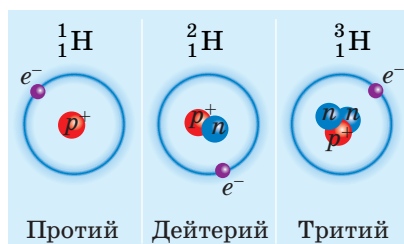
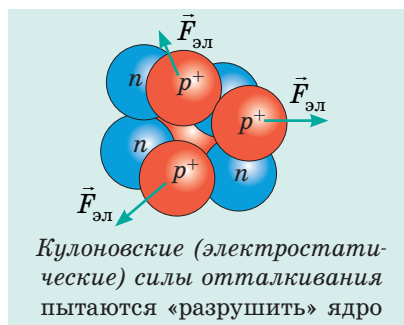


Рис. 22.7. Изотопы Гидрогена, существующие в природе. Символом  $e^-$  обозначены электроны,  $p^+$  — протоны,  $n$  — нейтроны



Кулоновские (электростатические) силы отталкивания пытаются «разрушить» ядро



Ядерные силы удерживают нуклоны внутри ядра

Рис. 22.8. Силы взаимодействия нуклонов ядра



Открытие строения атомного ядра можно назвать «международным».

Протон открыл английский физик, уроженец Новой Зеландии *Эрнест Резерфорд* (1911 г.), нейтрон — английский физик *Джеймс Чедвик* (1932 г.). Гипотезу о протонно-нейтронном строении ядра атома впервые независимо друг от друга выдвинули советский ученый, уроженец Полтавщины *Дмитрий Дмитриевич Иваненко* и немецкий ученый *Вернер Гейзенберг* (1932 г.). С тех пор представления о строении ядра практически не изменились.

2) *близкодействующие*: проявляются только на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м (размер нуклона);

3) *не зависят от заряда*: на одинаковом расстоянии силы, действующие между двумя протонами, между двумя нейтронами или между протоном и нейтроном, одинаковы;

4) *имеют свойство насыщения*: нуклон способен к ядерному взаимодействию одновременно только с небольшим количеством нуклонов-«соседей».



### Подводим итоги

В результате опытов под руководством Э. Резерфорда была создана ядерная модель строения атома, согласно которой весь положительный заряд атома сосредоточен в его ядре — части, размеры которой незначительны по сравнению с размерами атома.

Ядра атомов состоят из нуклонов — протонов и нейтронов. Число протонов ( $Z$ )

в ядре атома данного элемента равно порядковому номеру этого элемента в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, число нуклонов ( $A$ ) — нуклонному числу.

Вид атомов, характеризующийся определенным количеством протонов и определенным общим количеством нуклонов, называют нуклидом.

Разновидности атомов одного и того же химического элемента, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называют изотопами данного химического элемента.

Нуклоны удерживаются в ядре благодаря действию ядерных сил притяжения. Ядерные силы — близкодействующие: на расстояниях, которые больше размера нуклона, они не проявляются.



### Контрольные вопросы

1. Опишите опыт Э. Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц и его результаты.
2. Из каких частиц состоит атом? атомное ядро?
3. Что такое зарядовое число? массовое число?
4. Как определить количество протонов и нейтронов в ядре? Приведите пример.
5. Что такое нуклид?
6. Какие нуклиды называют изотопами? Назовите изотопы Водорода.
7. Какой тип взаимодействия обеспечивает удержание нуклонов в ядре атома?
8. Дайте определение ядерных сил, опишите их свойства.



### Упражнение № 22

1. Сколько протонов и сколько нейтронов в ядре атома Аргона  $^{40}_{18}\text{Ar}$ ?
2. Чем отличаются ядра изотопов Урана:  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{235}_{92}\text{U}$ ?
3. В ядре атома Бора содержится 5 протонов и 6 нейтронов. Сколько электронов в этом атоме? сколько нуклонов в ядре этого атома?

4. Среди приведенных символов химических элементов укажите тот, который соответствует атому с наибольшим количеством электронов: Ca, Cu, Ge, Sb, P. Воспользуйтесь Периодической системой химических элементов Д. И. Менделеева.
5. Оцените силу ядерного взаимодействия протонов ядра на расстоянии  $10^{-15}$  м.
6. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о жизни и научной деятельности нашего соотечественника Дмитрия Дмитриевича Иваненко.

## § 23. РАДИОАКТИВНОСТЬ. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

В XXI в. вряд ли найдется взрослый человек, который хотя бы раз в жизни не сделал рентгеновский снимок. А вот в конце XIX в. изображение руки человека с видимой структурой костей (рис. 23.1) обошло страницы газет всего мира, а для физиков стало настоящей сенсацией. Ученые начали исследование рентгеновских лучей и поиск их источников. Одним из таких ученых был французский физик А. Беккерель (рис. 23.2). Какими неожиданными результатами завершились его исследования, вы узнаете из этого параграфа.



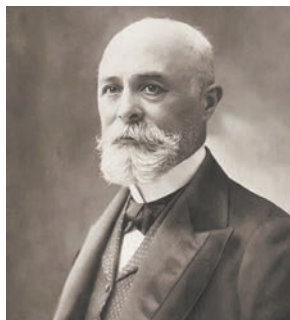
**Рис. 23.1.** Первый рентгеновский снимок руки человека

### 1 Узнаём об истории открытия радиоактивности

С открытия рентгеновских лучей началась история открытия радиоактивности, и помог в этом случай.

Толчком к исследованиям стало предположение, что рентгеновские лучи возникают при кратковременном свечении некоторых веществ, облученных перед этим солнечным светом\*. К таким веществам относятся, например, некоторые соли Урана.

Чтобы проверить указанное предположение и зная, что рентгеновские лучи, в отличие от световых, проникают сквозь плотную черную бумагу, А. Беккерель взял завернутую в такую бумагу фотопластинку\*\*, положил на нее крупинки урановой соли и на несколько часов вынес фотопластинку на яркий солнечный свет. После проявления на фотопластинке оказались темные пятна именно в тех местах, где лежала урановая соль. То есть выяснилось, что урановая соль действительно испускает



**Рис. 23.2.** Анри Антуан Беккерель (1852–1908) — французский физик, в 1896 г. открыл радиоактивное излучение солей Урана

\* Такое свечение называют *флюоресценцией*.

\*\* *Фотопластинка* — стеклянная пластинка, покрытая чувствительным к излучению веществом.

Альберт Эйнштейн сравнивал открытие радиоактивности с открытием огня, считая, что огонь и радиоактивность — одинаковые по значению вехи в истории человечества.



**Рис. 23.3.** Мария Склодовская-Кюри (1867–1934) — французский физик и химик (родилась в Польше), лауреат двух Нобелевских премий. Такой чести за всю историю были удостоены только три исследователя



**Рис. 23.4.** Пьер Кюри (1859–1906) — французский физик, лауреат Нобелевской премии

излучение, которое имеет большую проникающую способность (проходит сквозь плотную бумагу) и действует на фотопластинку.

Беккерель решил продолжить исследования и подготовил опыт, который несколько отличался от предыдущего. Но ученому помешала пасмурная погода, и он с сожалением положил приготовленные для опыта фотопластинку с урановой солью и медным крестом между ними в ящик стола. Через несколько дней, так и не дождавшись солнца, ученый решил на всякий случай проявить фотопластинку. Результат оказался неожиданным: на пластинке появился контур креста. Следовательно, солнечный свет был ни при чем, и *соль Урана сама, без влияния внешних факторов, испускает невидимое излучение*, которому не является преградой даже слой меди!

Позже такое излучение назовут **радиоактивным излучением** (от лат. *radio* — излучаю, *activus* — действенный); способность веществ к радиоактивному излучению — **радиоактивностью**; нуклиды, ядра которых имеют такую способность, — **радионуклидами**.

## 2 Узнаём о радионуклидах

«Только ли Уран испускает “лучи Беккереля”?» — с поиска ответа на этот вопрос начала свою работу по изучению радиоактивности *М. Склодовская-Кюри* (рис. 23.3). Тщательно проверив на радиоактивность практически все известные к тому времени элементы, она выяснила, что радиоактивные свойства имеет также Торий. Кроме того, М. Склодовская-Кюри и ее муж *П. Кюри* (рис. 23.4) открыли новые радиоактивные элементы, в частности Полоний и Радий.



Подумайте, что могло подтолкнуть супругов Кюри дать элементам именно такие названия.

Указанные выше элементы были выделены из естественных минералов, поэтому их называли естественными *радиоактивными элементами*.

Со временем выяснилось, что радиоактивность присуща всем без исключения нуклидам химических элементов, порядковый номер

которых больше 82 ( $Z > 82$ ). Однако и другие элементы имеют радиоактивные нуклиды (естественные или полученные искусственно).

### 3 Изучаем состав радиоактивного излучения

Опыты по изучению природы радиоактивного излучения показали, что радиоактивные вещества могут испускать лучи трех видов: положительно заряженные частицы ( $\alpha$  (альфа)-излучение), отрицательно заряженные частицы ( $\beta$  (бета)-излучение) и нейтральные лучи ( $\gamma$  (гамма)-излучение). На рис. 23.5 изображена схема одного из таких опытов: пучок радиоактивного излучения попадает в сильное магнитное поле постоянного магнита, а затем на фотопластинку. После проявления на фотопластинке четко видны три темных пятна.

**?** Вспомните, направление движения каких частиц принято в качестве направления электрического тока, и, воспользовавшись рис. 23.5 и правилом левой руки, убедитесь, что  $\alpha$ -частицы имеют положительный заряд.

Наибольший вклад в исследование  $\alpha$ -излучения сделал Э. Резерфорд. Ученый одним из первых выяснил, что  $\alpha$ -излучение — это поток ядер атомов Гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ), движущихся со скоростью порядка  $10^7$  м/с. Заряд  $\alpha$ -частицы равен двум элементарным зарядам:

$$q_\alpha = +2|e| \approx +3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

$\beta$ -излучение, как и  $\alpha$ -излучение, отклоняется магнитным полем, но в противоположную сторону.  $\beta$ -излучение — это поток электронов ( ${}^0_{-1}e$ ), летящих с огромной скоростью (близкой к скорости света).

**?** Запишите заряд и массу  $\beta$ -частицы.

Исследование  $\gamma$ -излучения показало, что это электромагнитные волны очень высокой частоты (свыше  $10^{18}$  Гц). Скорость распространения этих волн в вакууме равна  $3 \cdot 10^8$  м/с.

### 4 Защищаемся от радиоактивного излучения

У большинства людей слово «радиация» ассоциируется с опасностью. И это, безусловно, правильно. Радиоактивное излучение не фиксируется органами чувств человека, но известно, что оно может привести к губительным последствиям. От влияния радиации можно защититься, возведя на пути излучения препятствие.

Проще всего защититься от  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучений. Хотя  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы летят с огромной скоростью, их поток легко останавливает даже тонкое препятствие. Как показали эксперименты, достаточно листа бумаги толщиной 0,1 мм,

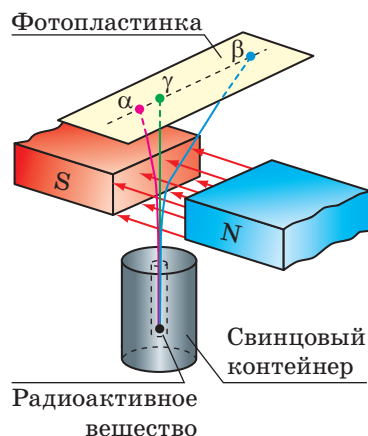


Рис. 23.5. Схема опыта по исследованию природы радиоактивного излучения

#### Виды радиоактивного излучения

$\alpha$ -частицы — ядра атомов Гелия  
 $\beta$ -частицы — быстрые электроны  
 $\gamma$ -лучи — высокочастотное (коротковолновое) электромагнитное излучение

чтобы остановить  $\alpha$ -частицы;  $\beta$ -излучение полностью поглощается, например, алюминиевой пластинкой толщиной 1 мм (рис. 23.6).

Труднее всего защититься от  $\gamma$ -излучения — оно проникает сквозь достаточно толстые слои материалов. В отдельных случаях для защиты от  $\gamma$ -излучения необходимы бетонные стены толщиной несколько метров.

## 5 Даём определение радиоактивности

Изучение радиоактивности показало, что радиоактивное излучение — это следствие преобразований ядер атомов. Причем эти преобразования происходят самопроизвольно (без каких бы то ни было причин), их нельзя ускорить или замедлить, они не зависят от внешнего воздействия, то есть на них не влияют изменения давления, температуры, освещенности, действия магнитного и электрического полей, химические реакции и т. п.

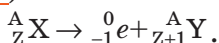
**Радиоактивность** — это способность ядер радионуклидов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с излучением микрочастиц.

Излучая  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы, исходное ядро (*материнское ядро*) преобразуется в ядро атома другого элемента (*дочернее ядро*);  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады могут сопровождаться  $\gamma$ -излучением. Установлено, что радиоактивные преобразования ядер подчиняются так называемым *правилам смещения*.

1. При  $\alpha$ -распаде количество нуклонов в ядре уменьшается на 4, протонов — на 2, поэтому образуется ядро элемента, порядковый номер которого на 2 единицы меньше порядкового номера исходного элемента (рис. 23.7):



2. При  $\beta$ -распаде количество нуклонов в ядре не изменяется, при этом количество протонов увеличивается на 1, поэтому образуется ядро элемента, порядковый номер которого на единицу больше порядкового номера исходного элемента (рис. 23.8):



? Известно, что Радон ( ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ ) является  $\alpha$ -радиоактивным. Ядро какого элемента образуется в результате  $\alpha$ -распада Радона?

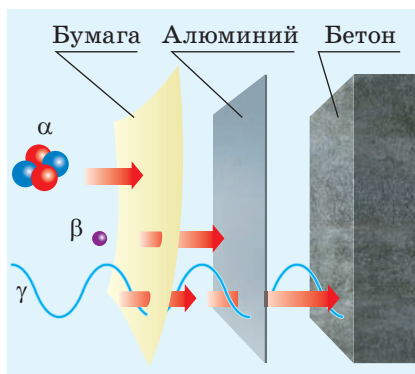


Рис. 23.6. Защита от радиоактивного излучения

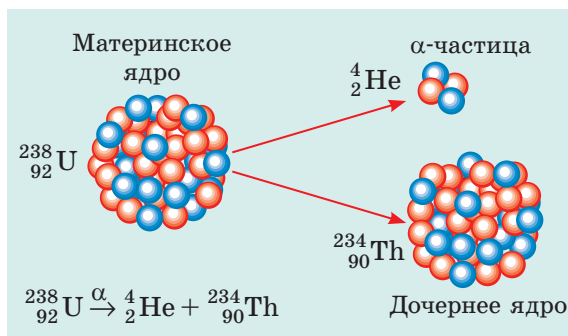


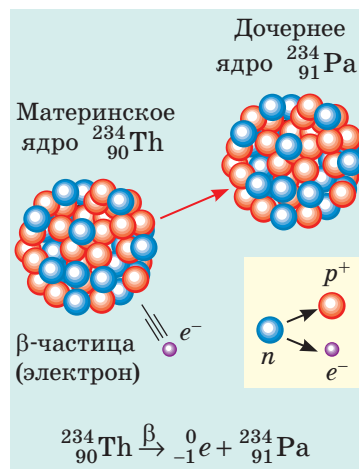
Рис. 23.7. При  $\alpha$ -распаде материнское ядро спонтанно делится на две части:  $\alpha$ -частицу и дочернее (новое) ядро



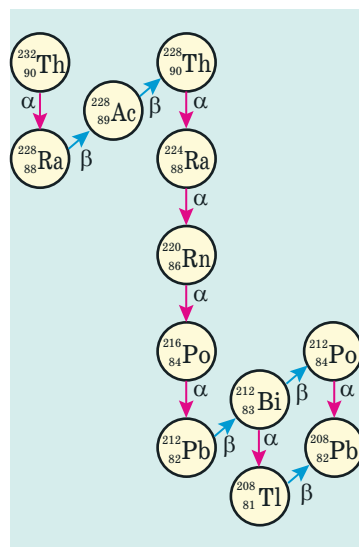
## \* 6 Узнаём о радиоактивных рядах

Получается, что после объяснения радиоактивности мечта алхимиков Средневековья о превращении веществ в золото сбылась? На самом деле — нет. Ученые выяснили, что исходное (материнское) ядро атома радиоактивного элемента X может претерпевать целый ряд преобразований: ядро атома элемента X превращается в ядро атома элемента Y, затем в ядро атома элемента Z и т. д., однако в этой цепочке не может быть случайных «гостей».

Совокупность всех изотопов, возникающих в результате последовательных радиоактивных преобразований данного материнского ядра, называют **радиоактивным рядом**. Одна из цепочек таких преобразований показана на рис. 23.9. Установлено, что существуют *четыре радиоактивных ряда*, объединяющих все известные в природе радиоактивные элементы: ряд Тория (начинается с Тория-232), ряд Урана — Радия (начинается с Урана-238); ряд Урана — Актиния (начинается с Урана-235); ряд Нептуния (начинается с Нептуния-237).



**Рис. 23.8.** При  $\beta$ -распаде один из нейтронов материнского ядра преобразуется в протон и электрон; электрон излучается, а протон остается в ядре (образуется новое ядро)



**Рис. 23.9.** Радиоактивный ряд Тория. Ряд начинается с Тория-232, встречающегося в природе, и заканчивается Плюмбумом-208, являющимся стабильным (не радиоактивным)



## Подводим итоги

Радиоактивное излучение открыл в 1896 г. французский физик А. Беккерель. Большинство существующих в природе и искусственно полученных нуклидов радиоактивны: их ядра самопроизвольно распадаются, излучая микрочастицы и преобразуясь в другие ядра.

Виды радиоактивного излучения		
$\alpha$ -частицы	$\beta$ -частицы	$\gamma$ -лучи
поток ядер Гелия	поток электронов	электромагнитные волны
$v_\alpha$ порядка $10^7$ м/с	$v_\beta$ около $3 \cdot 10^8$ м/с	$v_\gamma = c = 3 \cdot 10^8$ м/с
$q_\alpha = +2e$	$q_\beta = -e$	не заряжены
задерживаются листом бумаги толщиной 0,1 мм	задерживаются листом алюминия толщиной 1 мм	задерживаются слоем бетона толщиной несколько метров



### Контрольные вопросы

1. Как было открыто явление радиоактивности? 2. Приведите примеры естественных радионуклидов. 3. Опишите опыт по исследованию природы радиоактивного излучения. 4. Какие виды радиоактивного излучения вы знаете? Какова их физическая природа? 5. Как защититься от радиоактивного излучения? 6. Приведите определение радиоактивности. 7. Что происходит с ядром атома при излучении  $\alpha$ -частицы?  $\beta$ -частицы?

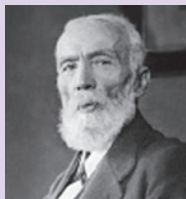


### Упражнение № 23

- Какие виды радиоактивного излучения воздействовали на фотопластинку в опытах А. Беккереля? Рассмотрите два случая: а) крупинки соли Урана лежат на черной бумаге, в которую завернута пластинка; б) соль Урана лежит на медном кресте, который, в свою очередь, лежит на завернутой в черную бумагу фотопластинке.
- Длина волны  $\gamma$ -излучения в вакууме 0,025 нм. Определите частоту волны.
- Воспользовавшись рис. 23.9, запишите несколько уравнений реакций распада, характерных для радиоактивного ряда Тория-232.
- При естественном радиоактивном распаде Радия ( $^{228}_{88}\text{Ra}$ ) из его ядер испускается  $\beta$ -частица. В ядро какого элемента преобразуется при этом ядро атома Радия? Запишите уравнение реакции.
- Определите массу  $\alpha$ -частицы, зная, что масса протона и масса нейтрона примерно равны  $1,7 \cdot 10^{-27}$  кг. Какова кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, если она движется со скоростью  $1,5 \cdot 10^7$  м/с?
- «Всё яд, и всё лекарство — это зависит от дозы». Эта фраза принадлежит известному врачу эпохи Возрождения *Парацельсу* (настоящее имя — Филипп Авреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм (1493–1541)). Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, как «вредное» радиоактивное излучение используют для лечения больных.
- Имеется 2 моль урана и 2 моль гелия. Сколько атомов в каждом веществе?



### Физика и техника в Украине



**Иван Павлович Пулюй** (1845–1918) — украинский физик, электротехник, изобретатель; работал в Австро-Венгрии. За 14 лет до Вильгельма Рентгена он сконструировал трубку, ставшую прообразом современных рентгеновских аппаратов. И. П. Пулюй глубже, чем В. Рентген, проанализировал природу и механизмы возникновения X-лучей (позже названных рентгеновскими), а также продемонстрировал их свойства. И. П. Пулюй одним из первых

начал конструировать и изготавливать вакуумные устройства. Широко известна люминесцентная газоразрядная лампа, которая вошла в историю техники как «лампа Пулюя» (Pulujlampe). Снимки в X-лучах, выполненные Пулюем с помощью этой лампы, чаще всех воспроизводились в европейских научно-популярных изданиях как непревзойденные по качеству для иллюстрации применения X-лучей в медицине.

Еще одна из разработок ученого — запатентованное изобретение, позволившее использовать линию передачи переменного тока для одновременной телефонной связи.

Имя И. П. Пулюя носит Тернопольский национальный технический университет; НАН Украины основала премию имени Ивана Пулюя за выдающиеся работы в области прикладной физики.

## § 24. АКТИВНОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Какое именно ядро в радиоактивном веществе распадется первым, какое — следующим, какое — последним? Физики утверждают, что узнать это невозможно: распад того или иного ядра радионуклида — событие случайное. Вместе с тем поведение радиоактивного вещества в целом подчиняется четким закономерностям.

### 1 Узнаём о периоде полураспада

Если взять закрытую стеклянную колбу, содержащую некоторое количество Радона-220, окажется, что примерно через 56 с количество атомов Радона в колбе уменьшится в два раза, в течение следующих 56 с — еще в два раза и т. д. Таким образом, понятно, почему интервал времени 56 с называют *периодом полураспада* Радона-220.

**Период полураспада**  $T_{1/2}$  — это физическая величина, которая характеризует радионуклид и равна времени, в течение которого распадается половина имеющегося количества ядер данного радионуклида.

*Единица периода полураспада в СИ — секунда:*

$$[T_{1/2}] = 1 \text{ с}.$$

У каждого радионуклида — свой период полураспада (см. таблицу).

- ? Образец содержит  $6,4 \cdot 10^{20}$  атомов Йода-131. Сколько атомов Йода-131 будет в образце через 16 суток?

### 2 Даём определение активности радиоактивного источника

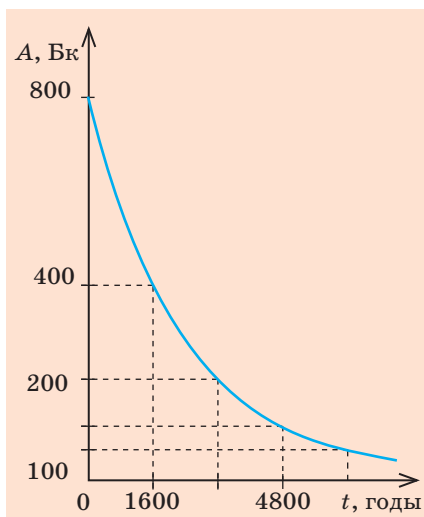
- ? И Уран-238, и Радий-226 являются  $\alpha$ -радиоактивными (их ядра могут спонтанно распадаться на  $\alpha$ -частицу и соответствующее дочернее ядро). Из какого образца за 1 с вылетит больше  $\alpha$ -частиц, если число атомов Урана-238 и Радия-226 одинаково?

Надеемся, вы правильно ответили на вопрос и, учитывая, что периоды полураспада данных радионуклидов отличаются почти в 3 млн раз, установили, что за одно и то же время в образце радия произойдет намного больше  $\alpha$ -распадов, чем в образце урана.

Физическую величину, численно равную количеству распадов, происходящих в радиоактивном источнике за единицу времени, называют **активностью радиоактивного источника**.

*Период полураспада  
некоторых радионуклидов*

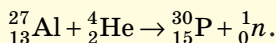
Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$
Йод-131	8 суток
Карбон-14	5700 лет
Кобальт-60	5,3 года
Плутоний-239	24 тыс. лет
Радий-226	1600 лет
Радон-220	56 с
Радон-222	3,8 суток
Уран-235	0,7 млрд лет
Уран-238	4,5 млрд лет
Цезий-137	30 лет



**Рис. 24.1.** График зависимости активности Радия-226 от времени. Период полураспада Радия-226 — 1600 лет

### История открытия искусственных радиоактивных изотопов

Первый искусственный радиоактивный изотоп ( $^{30}_{15}\text{P}$ ) был получен в 1934 г. супругами *Фредериком* и *Ирен Жолио-Кюри*. Облучая  $\alpha$ -частицами алюминий, они наблюдали излучение нейтронов, то есть происходила следующая ядерная реакция:



Итальянский физик *Энрико Ферми* известен несколькими достижениями, но свою высшую награду — Нобелевскую премию — он получил за открытие искусственной радиоактивности, вызванной облучением вещества медленными нейтронами. Сейчас метод облучения нейтронами широко применяют в промышленности для получения радиоактивных изотопов.

Активность радиоактивного источника обозначают символом  $A$ . Единица активности в СИ — **беккерель**.

**1 Бк** — это активность такого радиоактивного источника, в котором за 1 с происходит 1 акт распада:

$$[A] = 1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{распад}}{\text{с}} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

1 Бк — это очень малая активность, поэтому используют внесистемную единицу активности — **кюри (Ки)**:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$



В честь каких ученых названы указанные единицы? Какие открытия они сделали?

Если образец содержит атомы только одного радионуклида, то активность этого образца можно определить по формуле:

$$A = \lambda N,$$

где  $N$  — число атомов радионуклида в образце на данный момент времени;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада радионуклида (физическая величина, являющаяся характеристикой радионуклида и связанная с периодом полураспада соотношением:  $\lambda = \frac{0,69}{T_{1/2}}$ ;  $[\lambda] = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

Со временем количество нераспавшихся ядер радионуклидов в радиоактивном образце уменьшается, поэтому уменьшается и активность образца (рис. 24.1).

**3**

### Узнаём о применении радиоактивных изотопов

Наличие в объекте радионуклидов можно выявить по излучению. Вы уже выяснили, что интенсивность излучения зависит от вида радионуклида и его количества, которое со временем уменьшается. Все это положено в основу использования радиоактивных изотопов, которые физики научились получать искусственно. Сейчас для каждого химического элемента, встречающегося в природе, получены искусственные радиоактивные изотопы.

Можно выделить два направления использования радиоактивных изотопов.

1. *Использование радиоактивных изотопов в качестве индикаторов.* Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно определить наличие элемента, проследить за поведением элемента во время физических и биологических процессов и т. д. (см., например, [рис. 24.2](#)).

2. *Использование радиоактивных изотопов как источников  $\gamma$ -излучения* (см., например, [рис. 24.3](#)).

Рассмотрим несколько примеров.

**4**

#### **Выясняем, как используют радиоактивные изотопы для диагностики заболеваний**

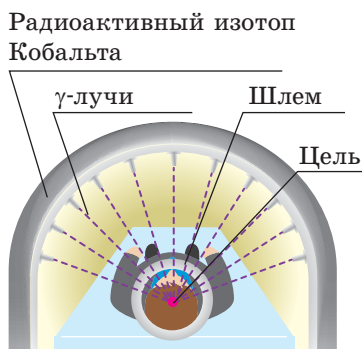
Организм человека имеет свойство накапливать в своих тканях определенные химические вещества. Известно, например, что щитовидная железа накапливает йод, костная ткань — фосфор, кальций и стронций, печень — некоторые красители и т. д. Скорость накопления веществ зависит от состояния здоровья органа. Например, при базедовой болезни активность щитовидной железы резко возрастает.

За количеством йода в щитовидной железе удобно следить при помощи его  $\gamma$ -радиоактивного изотопа. Химические свойства радиоактивного и стабильного йода не отличаются, поэтому радиоактивный Йод-131 будет накапливаться так же, как и его стабильный изотоп. Если щитовидная железа в норме, то через некоторое время после введения в организм Йода-131  $\gamma$ -излучение от него будет иметь определенную оптимальную интенсивность. А вот если щитовидная железа функционирует с отклонением от нормы, то интенсивность  $\gamma$ -излучения будет аномально высокой или, наоборот, низкой. Аналогичный метод применяют для исследования обмена веществ в организме, выявления опухолей и др.

Понятно, что, используя указанные методы диагностики, необходимо тщательно дозировать количество радиоактивного препарата, чтобы внутреннее облучение оказывало минимальное негативное воздействие на организм человека.

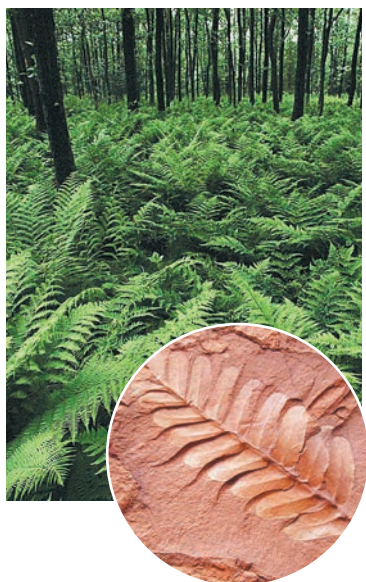


**Рис. 24.2.** Чтобы выяснить, как растения усваивают фосфорные удобрения, в эти удобрения добавляют радиоактивный изотоп Фосфора, затем исследуют растения на радиоактивность и определяют количество усвоенного фосфора

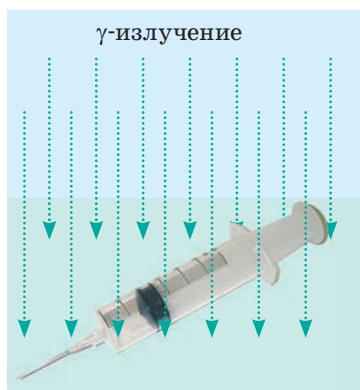


**Рис. 24.3.** Использование  $\gamma$ -излучения для лечения онкозаболеваний. Чтобы  $\gamma$ -лучи не уничтожали здоровые клетки, используют несколько слабых пучков  $\gamma$ -лучей, которые фокусируются на опухоли





**Рис. 24.4.** Полученный из молодого дерева 1 г углерода имеет активность 14–15 Бк (излучает 14–15  $\beta$ -частиц в секунду). Через 5700 лет после гибели дерева количество  $\beta$ -распадов в секунду уменьшается вдвое



**Рис. 24.5.** Самую распространенную медицинскую продукцию: шприцы, системы переливания крови и т. п. — перед отправкой потребителю тщательно стерилизуют с использованием  $\gamma$ -излучения

## 5 Определяем возраст древних предметов

В атмосфере Земли всегда имеется некоторое количество  $\beta$ -радиоактивного Карбона-14 ( $^{14}_6\text{C}$ ), который образуется из Нитрогена в результате ядерной реакции с нейтронами. В составе углекислого газа этот изотоп поглощается растениями, а через них — животными. Пока животное или растение живы, содержание радиоактивного Карбона в них остается неизменным. После прекращения жизнедеятельности количество радиоактивного Карбона в организме начинает уменьшаться, уменьшается и активность  $\beta$ -излучения. Зная, что период полураспада Карбона-14 составляет 5700 лет, можно определить возраст археологических находок (рис. 24.4).

## 6 Применяем $\gamma$ -излучение в технике

Особое значение в технике имеют *гамма-дефектоскопы*, с помощью которых проверяют, например, качество сваренных соединений. Если мастер, приваривая петли к воротам, допустил брак, через некоторое время петли отвалятся. Это неприятно, но ситуация поправима. А вот если брак случился при сварке элементов конструкции моста или ядерного реактора, трагедия неминуема. Благодаря тому что  $\gamma$ -лучи по-разному поглощаются массивной сталью и сталью с пустотами, гамма-дефектоскоп «видит» трещины внутри металла, а следовательно, выявляет брак еще на стадии изготовления конструкции.

## 7 Уничтожаем микробы с помощью радиации

Известно, что определенная доза облучения убивает организмы. Но ведь не все организмы полезны человеку. Так, медики постоянно работают над тем, чтобы избавиться от болезнетворных микробов. Вспомните: в больницах моют пол со специальными растворами, облучают помещение ультрафиолетом, обрабатывают медицинские инструменты и т. д. Такие процедуры называют дезинфекцией и стерилизацией.

Поставить процесс стерилизации на промышленную основу позволили особенности  $\gamma$ -излучения (рис. 24.5). Такая стерилизация осуществляется в специальных установках

с надежной защитой от проникающей радиации. В качестве источника  $\gamma$ -лучей используют искусственно созданные изотопы Кобальта и Цезия ( $^{60}_{27}\text{Co}$  и  $^{137}_{55}\text{Cs}$ ).

## 8 Учимся решать задачи

**Задача.** Определите массу Радия-226, если его активность составляет 5 Ки. Постоянная радиоактивного распада Радия-226 равна  $1,37 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ .

*Анализ физической проблемы, поиск математической модели*

Для решения задачи воспользуемся формулой для определения активности:  $A = \lambda N$ . Зная активность, выясним количество  $N$  атомов Радия. Массу вещества можно определить, умножив число атомов на массу одного атома:  $m = N \cdot m_0$ .

Из курса химии вы знаете:

- 1 моль вещества содержит  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  атомов;
- масса атома  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ , где  $M$  — молярная масса вещества (масса 1 моль).

**Дано:**

$$A = 5 \text{ Ки} = 5 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

$$\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$$

$$M = 226 \text{ г/моль} =$$

$$= 226 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

**Найти:**

$m$  — ?

**Решение**

$$m = N \cdot m_0, \text{ где } m_0 = \frac{M}{N_A}, \text{ следовательно, } m = N \cdot \frac{M}{N_A}.$$

$$\text{Поскольку } A = \lambda N, \text{ то } N = \frac{A}{\lambda}.$$

Подставим выражение для  $N$  в формулу для массы:

$$m = \frac{A}{\lambda} \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{AM}{\lambda N_A}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[m] = \frac{\text{Бк} \cdot \text{кг/моль}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{1/моль}} = \frac{\text{с}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{моль}} = \text{кг}; \quad m = \frac{5 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 226 \cdot 10^{-3}}{1,37 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}.$$

**Ответ:**  $m = 5,1 \text{ г}$ .



## Подводим итоги

Время, в течение которого распадается половина имеющегося количества ядер данного радионуклида, называют периодом полураспада  $T_{1/2}$ .

Период полураспада является характеристикой данного радионуклида.

Физическую величину, которая численно равна количеству распадов, происходящих в данном радиоактивном источнике за единицу времени, называют активностью радиоактивного источника. Если источник содержит атомы только одного радионуклида, активность  $A$  источника можно определить по формуле  $A = \lambda N$ , где  $N$  — количество атомов радионуклида в образце;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада радионуклида. Единица активности в СИ — беккерель (Бк).

Со временем активность радиоактивного образца уменьшается, и это используют для определения возраста археологических находок.

Искусственные изотопы применяют для стерилизации медицинских изделий, диагностики и лечения заболеваний, выявления дефектов в металлах и др.



### Контрольные вопросы

**1.** Дайте определение периода полураспада. Что характеризует эта физическая величина? **2.** Что такое активность радиоактивного источника? **3.** Какова единица активности в СИ? **4.** Как активность радионуклида связана с его постоянной радиоактивного распада? **5.** Изменяется ли со временем активность радионуклидного образца? Если изменяется, то почему и как? **6.** Приведите примеры использования радиоактивных изотопов.



### Упражнение № 24

1. Имеется одинаковое количество ядер Йода-131, Радона-220 и Урана-235. Какой радионуклид имеет наибольший период полураспада? Активность какого образца на данный момент времени наибольшая? Поясните ответ.
2. В образце содержится  $2 \cdot 10^{20}$  атомов Йода-131. Определите, сколько ядер Йода в образце распадётся в течение часа. Активность Йода-131 на протяжении этого времени считайте неизменной. Постоянная радиоактивного распада Йода-131 равна  $9,98 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ .
3. Период полураспада радиоактивного Карбона-14 составляет 5700 лет. Во сколько раз уменьшилось количество атомов Карбона-14 в сосне, срубленной 17 100 лет назад?
4. Определите период полураспада радионуклида, если за интервал времени 1,2 с количество распавшихся ядер составило 75 % их начального количества.
5. На данный момент в радиоактивном образце содержится 0,05 моль Радона-220. Определите активность Радона-220 в образце.
6. На сегодня одними из самых важных считаются исследования обмена веществ в организме человека с помощью радиоактивных изотопов. В частности, выяснилось, что за сравнительно небольшое время организм почти полностью восстанавливается. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте об этих исследованиях больше.

### Физика и техника в Украине

**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» (ХФТИ)** — всемирно известный научный центр. Основан в 1928 г. по инициативе академика А. Ф. Иоффе как Украинский физико-технический институт с целью исследований в области ядерной физики и физики твердого тела.

Уже в 1932 г. в институте был достигнут выдающийся результат — осуществлено расщепление ядра атома Лития. Позднее в лабораторных условиях получены жидкие водород и гелий, построен первый трехкоординатный радиолокатор, проведены первые исследования высоковакуумной техники, что послужило толчком к развитию нового физико-технологического направления — вакуумной металлургии. Ученые института сыграли важную роль в решении проблем использования атомной энергии.

В разные годы в ННЦ ХФТИ работали выдающиеся физики: И. В. Обреимов, Л. Д. Ландау, И. В. Курчатов, К. Д. Синельников, Л. В. Шубников, А. И. Лейпунский, Е. М. Лифшиц, И. М. Лифшиц, А. К. Вальтер, Б. Г. Лазарев, Д. Д. Иваненко, А. И. Ахиезер, В. Е. Иванов, Я. Б. Файнберг, Д. В. Волков и др. В институте были созданы научные школы, известные во всем мире.

В ННЦ ХФТИ расположены крупнейший в СНГ линейный ускоритель электронов и совокупность термоядерных комплексов «Ураган».

Генеральный директор центра — известный украинский физик, академик НАНУ *Николай Федорович Шульга*.

## § 25. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИОАКТИВНЫЙ ФОН. ДОЗИМЕТРЫ

Радиоактивное излучение может быть опасным для организмов. Из этого параграфа вы узнаете, почему это так, с помощью каких приборов можно измерить уровень радиации, какой уровень радиации опасен, а при каком можно быть спокойными.

### 1 Узнаём о воздействии ионизирующего излучения на организмы

Радиоактивные  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения оказывают значительное воздействие на организмы. Попадая в вещество, радиоактивное излучение передает ему энергию. В результате поглощения этой энергии некоторые атомы и молекулы вещества ионизируются (рис. 25.1) — их химическая активность изменяется и образуются новые, чрезвычайно активные химические соединения.

Жизнедеятельность любого организма обеспечивается химическими реакциями, происходящими в его клетках, поэтому мощное радиоактивное облучение приводит к нарушению функций почти всех органов. Так, у человека увеличиваются хрупкость и проницаемость сосудов, снижается сопротивляемость организма, происходит разлад деятельности желудочно-кишечного тракта, нарушаются функции кроветворных органов, нормальные клетки перерождаются в злокачественные.

### 2 Характеризуем ионизирующее излучение

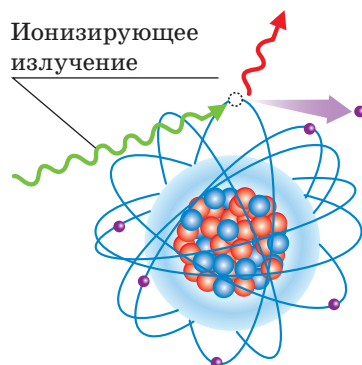
Чем больше поглощенная веществом энергия излучения, тем большее воздействие оказывает это излучение на вещество.

Отношение энергии  $W$  ионизирующего излучения, поглощенной веществом, к массе  $m$  этого вещества называют **поглощенной дозой ионизирующего излучения** ( $D$ ):

$$D = \frac{W}{m}$$

Единица поглощенной дозы в СИ — **грей** (в честь английского физика Л. Грея (рис. 25.2)):

$$[D] = 1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$



**Рис. 25.1.** В результате поглощения энергии ионизирующего излучения электрон вылетает из атома и атом преобразуется в положительный ион



**Рис. 25.2.** Льюис Харольд Грей (1905–1965) — английский физик, работал над проблемами, связанными с действием облучения на биологические системы; основатель радиобиологии

*Коэффициенты качества  
некоторых видов  
ионизирующего излучения*

Вид излучения	Коэффициент качества ( $K$ )
$\alpha$ -излучение	20
$\beta$ -излучение	1
$\gamma$ -излучение	1
Нейтроны	5–10
Протоны	5



**Рис. 25.3.** Рольф Максимилиан Зиверт (1896–1966) — шведский ученый. Работал в области медицинской физики, изучал воздействие радиации на биологические системы



**Рис. 25.4.** Змеи очень устойчивы к радиации. Некоторые из них могут выдержать радиоактивное излучение до 150 Гр

Биологическое действие на организмы разных видов излучения неодинаково при одинаковой поглощенной дозе. Так, при одинаковой энергии  $\alpha$ -излучение значительно опаснее, чем  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучение.

Физическую величину, характеризующую биологическое действие поглощенной дозы ионизирующего излучения, называют **эквивалентной дозой ионизирующего излучения ( $H$ )**:

$$H = K \cdot D,$$

где  $D$  — поглощенная доза;  $K$  — коэффициент качества, характеризующий опасность данного вида излучения: чем больше коэффициент качества, тем опаснее излучение (см. таблицу).

Единица эквивалентной дозы в СИ — **зиверт** (названа в честь шведского ученого Р. Зиверта (рис. 25.3)):

$$[H] = 1 \text{ Зв.}$$

### 3 Выясняем особенности воздействия радиации

Повреждения организмов, обусловленные действием радиации, имеют ряд особенностей.

Во-первых, наиболее чувствительны к радиации быстро делящиеся клетки. Так, действие радиоактивного излучения первым ощущает костный мозг, вследствие чего нарушается процесс кроветворения.

Во-вторых, разные типы организмов имеют разную чувствительность к радиоактивному излучению (рис. 25.4). Самые стойкие к радиации — одноклеточные.

В-третьих, последствия воздействия одинаковой поглощенной дозы излучения зависят от возраста организма.

Отметим, что кроме внешнего облучения существует опасность и внутреннего облучения, ведь радионуклиды могут попасть в организм, например, с пищей или водой. Повышенная опасность внутреннего облучения обусловлена несколькими причинами.

Во-первых, некоторые радионуклиды способны выборочно накапливаться в определенных органах. Например, 30 % йода накапливается в щитовидной железе, масса которой



составляет лишь 0,03 % массы тела человека. Радиоактивный Йод, таким образом, всю свою энергию отдает небольшому объему ткани.

Во-вторых, внутреннее облучение является длительным: радионуклид, попавший в организм, не сразу выводится из него, а проходит ряд радиоактивных преобразований внутри организма. При этом возникает радиоактивное излучение, которое ионизирует молекулы, изменяя тем самым их биохимическую активность.

#### 4 Узнаём о радиационном фоне

Все люди на Земле испытывают воздействие радиации, ведь в любой местности всегда есть *радиационный фон* (рис. 25.5).

Радиационный фон Земли складывается из нескольких компонентов: космическое излучение; излучение естественных радионуклидов, содержащихся в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды; излучение искусственных радиоактивных изотопов.

Излучение естественных радионуклидов и космическое излучение создают **естественный радиационный фон**.

В результате деятельности человека естественный радиационный фон Земли значительно изменился — произошло *техногенное повышение естественного радиационного фона*. Пример такой деятельности — добыча полезных ископаемых, имеющих повышенную концентрацию радионуклидов. Так, повышенное содержание естественных радионуклидов имеется



**Рис. 25.5.** Средние эквивалентные дозы ионизирующего излучения, которые получает человек в течение года от некоторых источников радиации

в граните. А далее выстраиваем цепочку. Гранитный щебень — компонент бетона, из которого сооружают дома. Значит, повышенный радиационный фон следует искать прежде всего внутри зданий из бетона, особенно в закрытых непрветриваемых помещениях (концентрация радона в закрытых помещениях в среднем в восемь раз выше, чем снаружи).

**?** Проанализируйте [рис. 25.5](#). Из каких источников человек получает наибольшую дозу радиации? Значительно ли воздействие радиации, связанной с развитием атомной энергетики?

## 5 Знакомимся с дозиметром

Жизнь на Земле возникла и развивается в условиях непрерывного воздействия радиации, поэтому естественный радиационный фон существенно не влияет на жизнь и здоровье людей. Современные радиобиологические исследования показывают, что при дозах, соответствующих естественному радиационному фону 1–2 мЗв в год, воздействие радиации безопасно для человека.

Но даже небольшое превышение уровня радиации может вызвать генетические дефекты, которые, возможно, проявятся у детей или внуков облученного человека. Большие дозы радиации служат причиной серьезных поражений тканей. Например, полученная за несколько часов эквивалентная доза ионизирующего облучения 1 Зв вызывает опасные изменения в крови, а доза 3–5 Зв в 50 % случаев служит причиной гибели. Поэтому работники, имеющие дело с радиацией или некоторое время находящиеся на радиационно загрязненной территории, обязательно пользуются *дозиметрами*.

**Дозиметр** — прибор для измерения дозы ионизирующего излучения, полученной прибором (и, следовательно, тем, кто им пользуется) за некоторый интервал времени, например за время пребывания на определенной территории или в течение рабочей смены.

Приборы для измерения интенсивности радиоактивного излучения от определенного источника (жидкости, газа, загрязненной поверхности) называют **радиометрами** (или *дозиметрами второго типа*) ([рис. 25.6, а](#)).

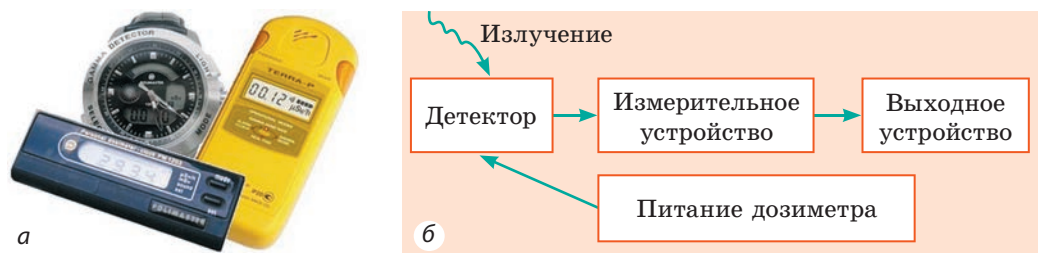
В организме человека содержится около  $3 \cdot 10^{-3}$  г радиоактивного калия и  $6 \cdot 10^{-9}$  г радия. В результате в теле человека каждую секунду происходит 6000  $\beta$ -распадов и 220  $\alpha$ -распадов. Еще 2500  $\beta$ -распадов в секунду происходит благодаря радиоактивному углероду. В целом в теле человека каждую секунду происходит 10 000 актов распада.

Основной составляющей любого дозиметра и радиометра является *детектор* — устройство для регистрации ионизирующего излучения (см. [рис. 25.6, б](#)). При попадании ионизирующего излучения на детектор возникают электрические сигналы (импульсы тока или напряжения), которые считываются измерительным устройством. Данные о дозе ионизирующего излучения подаются на выходное устройство (выводятся на дисплей дозиметра); информация о повышении радиации может подаваться свечением, звуковым сигналом и т. п.



## Подводим итоги

Попадая в вещество, радиоактивное излучение передает ему энергию. В результате некоторые атомы и молекулы вещества



**Рис. 25.6.** Бытовые дозиметры (радиометры): *а* — вид; *б* — типовая блок-схема

ионизируются, изменяется их химическая активность. Так как жизнедеятельность организмов базируется на химических реакциях, радиоактивное излучение оказывает биологическое действие.

Отношение энергии  $W$  ионизирующего излучения, поглощенной веществом, к массе  $m$  этого вещества называют поглощенной дозой ионизирующего излучения  $D$ :  $D = W/m$ .

Биологическое действие ионизирующего излучения зависит как от поглощенной дозы, так и от особенностей самого излучения; характеристикой биологического действия является эквивалентная доза ионизирующего излучения:  $H = KD$ , где  $K$  — коэффициент качества.

Единица поглощенной дозы ионизирующего излучения в СИ — грей (Гр), единица эквивалентной дозы — зиверт (Зв). Для измерения доз ионизирующего излучения используют дозиметры.

На поверхности Земли регистрируется определенный уровень радиации — радиационный фон, состоящий из космического излучения, излучения естественных и искусственных радионуклидов.

### Контрольные вопросы



1. В чем проявляется биологическое действие радиации на организмы?
2. Дайте определение поглощенной дозы ионизирующего излучения. Какова ее единица в СИ?
3. Как вычисляют эквивалентную дозу ионизирующего излучения? Какова ее единица в СИ?
4. Каковы особенности воздействия радиации? Чем обусловлена повышенная опасность радионуклидов, попавших в организм?
5. Назовите причины, по которым вы всегда и независимо от того, где живете, испытываете действие радиации.
6. Что такое радиационный фон? Из каких компонентов он состоит?
7. Назовите источники радиационного фона Земли.
8. Для чего предназначены дозиметры? Каков принцип их действия?



### Упражнение № 25

1. Как, находясь вблизи источника  $\alpha$ -излучения, можно защититься от негативного воздействия радиации?
2. В результате внешнего облучения сотрудник лаборатории каждую секунду получает поглощенную дозу ионизирующего излучения, равную  $2 \cdot 10^{-9}$  Гр. Какую поглощенную дозу получит работник в течение часа?
3. В результате внутреннего облучения каждый грамм живой ткани поглотил  $10^8$   $\alpha$ -частиц. Определите эквивалентную дозу облучения, если энергия каждой  $\alpha$ -частицы равна  $8,3 \cdot 10^{-13}$  Дж.

4. Какую эквивалентную дозу ионизирующего излучения получит человек, находящийся вблизи источника  $\gamma$ -излучения в течение 1 ч, если ежесекундно он получает поглощенную дозу ионизирующего излучения  $25 \cdot 10^{-9}$  Гр?
5. Существует гипотеза, что человечество возникло благодаря мутациям, произошедшим у обезьян в результате воздействия радиоактивного излучения. Воспользовавшись дополнительными источниками информации, узнайте об этой гипотезе больше. Можно ли с ней согласиться? Обоснуйте свою точку зрения.



### Экспериментальное задание

Если у вас есть возможность воспользоваться дозиметром, измерьте радиационный фон в разных точках своей квартиры, вблизи гранитной мостовой, в бетонном, кирпичном и деревянном домах, в подвале дома, на верхнем этаже. Поясните результаты своих исследований.



## § 26. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

«...Предыдущие эпохи получили свои названия от различных материалов: был век каменный, бронзовый, железный. Но ни одного из них не было бы, если бы человек не знал огня. Истинное богатство мира — его энергия», — писал английский радиохимик, лауреат Нобелевской премии *Фредерик Содди* (1877–1956) в своей книге «Материя и энергия». XX век можно назвать атомным, ведь именно в этом столетии человек открыл и начал укрощать энергию атомного ядра. О том, как исследования по ядерной физике помогают обеспечить человечество энергией, вы узнаете из этого параграфа.

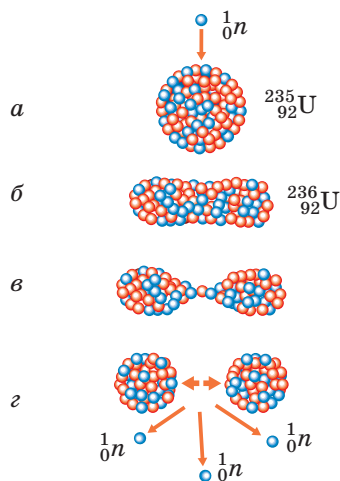
1

### Узнаём о делении тяжелых ядер и цепной ядерной реакции

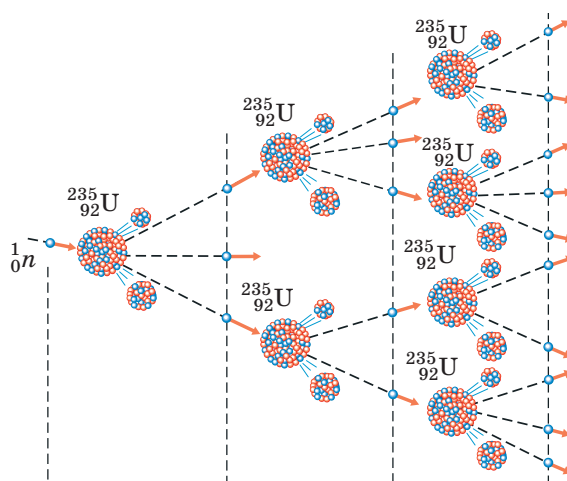
В конце 1938 г. немецкие радиохимики *Отто Ган* (1879–1968) и *Фриц Штрассман* (1902–1980) проводили опыты с облучением урана нейтронами. К величайшему удивлению ученых, в ходе опытов были обнаружены Барий и некоторые другие элементы средней части Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева.

Изучая неожиданные для того времени результаты опытов, австралийский радиохимик *Лиза Мейтнер* (1878–1968) и английский физик *Отто Фриш* (1904–1979) пришли к выводу, что ядро Урана (тяжелое ядро), поглощая нейтрон, распадается на более легкие ядра. Так было открыто **расщепление ядра** — *деление тяжелого атомного ядра на два (реже три) ядра, которые называют осколками деления\** (рис. 26.1).

\* В 1945 г. за открытие расщепления тяжелых атомных ядер О. Ган получил Нобелевскую премию по химии.



**Рис. 26.1.** Схема деления ядра Урана. Поглощая нейтрон (а), ядро Урана возбуждается и приобретает вытянутую форму (б); постепенно растягиваясь (в), новое неустойчивое ядро распадается на два осколка (г)



**Рис. 26.2.** Схематическое изображение цепной ядерной реакции: во время одного акта деления ядра Урана высвобождаются 2 или 3 нейтрона, благодаря которым и развивается цепная ядерная реакция

**?** Рассмотрите рис. 26.1 и объясните, почему осколки разлетаются с огромной скоростью. *Подсказка:* ядерные силы (силы притяжения, удерживающие нуклоны внутри ядра) — близкодействующие, а вот электростатические (кулоновские) силы — дальнодействующие.

Рассматривая схему на рис. 26.1, вы, наверное, обратили внимание на то, что при расщеплении ядра Урана кроме осколков деления высвобождаются нейтроны. Эти нейтроны могут вызвать деление других ядер Урана, которые, в свою очередь, тоже выпустят нейтроны, способные вызвать деление следующих ядер, и т. д. Количество расщепляющихся ядер будет быстро расти — в урановом образце будет протекать **цепная ядерная реакция** деления (рис. 26.2).

Цепная ядерная реакция сопровождается *выделением колоссальной энергии*. При делении одного ядра Урана выделяется всего лишь  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж энергии, но если распадутся все ядра, содержащиеся, например, в 1 моль урана (235 г урана;  $6,02 \cdot 10^{23}$  ядер Урана), выделившаяся энергия будет равна примерно  $19,2 \cdot 10^{12}$  Дж. Столько же энергии выделится, если сжечь 450 т нефти.

## 2 Знакомимся со строением ядерного реактора

Цепная реакция деления, происходящая в уране и некоторых других веществах, является основой для преобразования ядерной энергии в тепловую и электрическую. Вспомните: при цепной реакции непрерывно появляются все новые и новые осколки деления, движущиеся с большой скоростью. Если урановый стрежень погрузить в холодную воду, то осколки будут



сталкиваться с молекулами воды и отдавать им свою энергию. В результате холодная вода нагреется или даже превратится в пар. Именно так работает *ядерный реактор*, в котором ядерная энергия преобразуется в тепловую.

**Ядерный реактор** — устройство, предназначенное для осуществления управляемой цепной ядерной реакции деления, которая всегда сопровождается выделением энергии.

В ядерных реакторах (рис. 26.3) ядерное топливо (уран или плутоний) размещают внутри так называемых *тепловыделительных элементов* (ТВЭЛов). Продукты деления нагревают оболочки ТВЭЛов, и те передают тепловую энергию воде, которая в данном случае является теплоносителем. Полученная энергия преобразуется в электрическую (рис. 26.4) подобно тому, как это происходит на обычных тепловых электростанциях.

Чтобы управлять цепной ядерной реакцией и исключить вероятность взрыва, используют *регулирующие стержни*, изготовленные из материала, который хорошо поглощает нейтроны. Так, если температура в реакторе увеличивается, стержни автоматически углубляются в промежутки между ТВЭЛами. В результате количество нейтронов, вступающих в реакцию, уменьшается и цепная ядерная реакция замедляется.

### 3 Узнаём о термоядерной реакции

Вы уже знаете, что в результате деления тяжелых ядер образуются элементы средней части Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева и выделяется энергия (рис. 26.5, а). Эту энергию называют ядерной, ведь она «скрыта» в ядре атома. Если бы нам «вздумалось» снова соединить осколки деления, нужно было бы затратить такую же энергию.

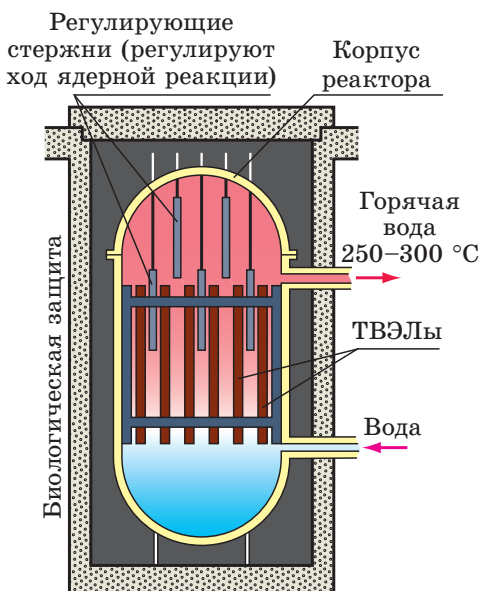


Рис. 26.3. Схема устройства ядерного реактора

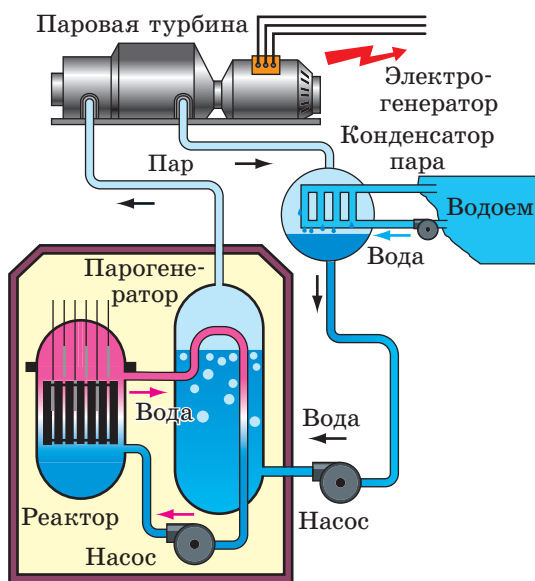


Рис. 26.4. Принцип работы атомной электростанции

**?** Вспомните, на каком фундаментальном законе физики основано последнее утверждение.

А вот если взять ядра изотопов легких элементов, например ядро Дейтерия и ядро Трития, то в результате их соединения энергия будет выделяться\* (рис. 26.5, б).

Реакцию слияния легких ядер в более тяжелые, которая происходит при очень высоких температурах (свыше  $10^7$  °С) и сопровождается выделением энергии, называют **термоядерным синтезом**.

Высокие температуры, то есть большие кинетические энергии ядер, нужны для того, чтобы преодолеть силы электрического отталкивания ядер (одноименно заряженных частиц). Без этого невозможно сблизить легкие ядра на такие расстояния, на которых начинают действовать ядерные силы притяжения.

В природе термоядерные реакции происходят в недрах звезд, где изотопы Гидрогена преобразуются в Гелий (см. рис. 26.5, б). Так, в результате термоядерных реакций, протекающих в недрах Солнца, оно каждую секунду излучает в космическое пространство  $3,8 \cdot 10^{26}$  Дж энергии. Это колоссальная энергия: чтобы получить столько энергии, нужно сжечь в тысячу раз больше угля, чем содержат все известные запасы на Земле.

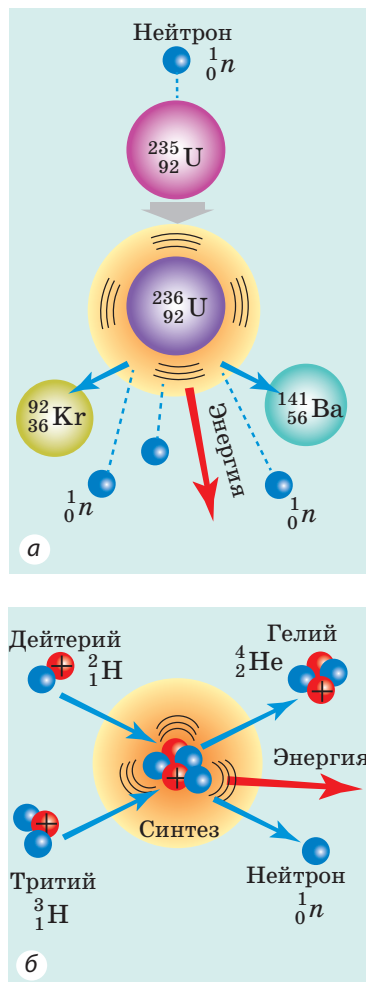
Термоядерные реакции — это практически неисчерпаемый источник энергии. Физики уже научились создавать условия для возникновения таких реакций, а вот их использование в промышленном масштабе пока остается на уровне экспериментов.

**4**

#### Учимся решать задачи

**Задача.** Определите массу Урана-235, расходуемого за сутки реактором атомной электростанции, если выходная электрическая мощность соответствующего блока электростанции равна 1000 МВт, а его КПД — 30 %. Масса одного ядра Урана-235 равна  $3,9 \cdot 10^{-25}$  кг, а при каждом делении выделяется  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж энергии.

\* Данное свойство объясняется разной удельной энергией связи атомных ядер, о которой вы узнаете, изучая физику в старшей школе.



**Рис. 26.5.** Распад тяжелых ядер (а) и синтез легких ядер (б) сопровождаются выделением энергии

### Анализ физической проблемы, поиск математической модели

Для решения задачи воспользуемся определением КПД:  $\eta = \frac{E_{\text{полезн}}}{E_{\text{полн}}}$ .

Здесь  $E_{\text{полезн}}$  — электрическая энергия, которую вырабатывает блок атомной электростанции за сутки:  $E_{\text{полезн}} = P_{\text{полезн}} \cdot t$  (время  $t$  выражено в секундах);  $E_{\text{полн}}$  — полная энергия, выделяющаяся в реакторе:  $E_{\text{полн}} = E_0 \cdot N$ , где  $E_0$  — энергия, выделяющаяся при распаде одного ядра,  $N$  — количество распавшихся ядер. Количество ядер Урана-235 выразим через массу Урана-235 в топливе ( $m$ ) и массу одного ядра ( $m_0$ ):  $N = \frac{m}{m_0}$ .

**Дано:**

$$t = 1 \text{ сутки} = 1 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}$$

$$P_{\text{полезн}} = 1000 \text{ МВт} =$$

$$= 1 \cdot 10^9 \text{ Вт}$$

$$\eta = 30 \% = 0,3$$

$$m_0 = 3,9 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$$

$$E_0 = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

**Найти:**

$m$  — ?

**Решение**

По определению КПД:  $\eta = \frac{E_{\text{полезн}}}{E_{\text{полн}}}$ , где

$$E_{\text{полезн}} = P_{\text{полезн}} \cdot t; E_{\text{полн}} = E_0 \cdot N = \frac{E_0 \cdot m}{m_0}.$$

Подставим выражения для определения  $E_{\text{полезн}}$  и  $E_{\text{полн}}$  в формулу КПД:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}} \cdot t \cdot m_0}{E_0 \cdot m}.$$

Из последней формулы найдем массу ядерного топлива:  $m = \frac{P_{\text{полезн}} \cdot t \cdot m_0}{E_0 \cdot \eta}$ .

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[m] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж/с} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$$

$$m = \frac{1 \cdot 10^9 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 3,9 \cdot 10^{-25}}{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 0,3} = \frac{10^9 \cdot 24 \cdot 36 \cdot 10^2 \cdot 39 \cdot 10^{-25}}{32 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 3,5 \text{ (кг)}.$$

**Ответ:**  $m = 3,5 \text{ кг}$ .

Даже один блок атомной электростанции вырабатывает энергии больше, чем потребляет крупный город. Действительно, за сутки блок атомной электростанции вырабатывает:  $E_{\text{полезн}} = P_{\text{полезн}} \cdot t = 1000 \text{ МВт} \cdot 24 \text{ ч} = 24 \text{ 000 МВт} \cdot \text{ч}$  энергии, а, например, Киев в летние месяцы потребляет в сутки всего лишь 300 МВт·ч.



### Подводим итоги

Поглощение нейтрона ядром Урана может вызвать распад ядра. Эта реакция сопровождается высвобождением нейтронов, содержащихся в ядре, а те, в свою очередь, могут вызвать деление других ядер Урана — будет происходить цепная ядерная реакция, сопровождающаяся выделением огромной энергии. Процесс преобразования ядерной энергии в тепловую происходит в ядерных реакторах — устройствах, предназначенных для проведения управляемой цепной ядерной реакции деления.

Выделением энергии сопровождается и процесс синтеза некоторых легких ядер. Такую реакцию называют термоядерной, поскольку для ее начала необходима очень высокая температура. Термоядерные реакции синтеза происходят в недрах звезд. Сейчас ученые работают над созданием термоядерных реакторов — устройств для получения энергии за счет реакции термоядерного синтеза легких ядер, протекающей в плазме при очень высоких температурах (свыше  $10^7$  °C).



### Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят вследствие поглощения нейтрона ядром Урана?
2. Опишите механизм цепной ядерной реакции.
3. Какие преобразования энергии происходят в ядерных реакторах?
4. Как работает атомная электростанция?
5. Какой процесс называют термоядерным синтезом?
6. Откуда «берут» энергию звёзды?



### Упражнение № 26

1. В ясный солнечный день на каждый  $1 \text{ м}^2$  открытой горизонтальной поверхности каждую секунду попадает 650 Дж солнечной энергии. Сколько солнечной энергии попадает на крышу здания за час, если площадь крыши равна  $100 \text{ м}^2$ ? Сколько (в килограммах) сухих дров необходимо сжечь, чтобы получить такое же количество энергии (удельная теплота сгорания сухих дров —  $10 \text{ МДж/кг}$ )? Подумайте, где вам могут понадобиться подобные расчеты.
2. Сколько энергии можно получить при делении 1 г Урана-235, если при делении каждого ядра выделяется энергия, равная  $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ ?
3. Мощность реактора атомного ледокола — 80 000 кВт. Потребление реактором Урана-235 составляет 500 г в сутки. Определите КПД реактора.
4. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и выясните, когда была осуществлена первая управляемая цепная ядерная реакция; когда и где был создан первый промышленный ядерный реактор; существуют ли на нашей планете места, где происходила естественная цепная ядерная реакция.

### Физика и техника в Украине

**Институт ядерных исследований НАНУ** (Киев) — ведущее научное учреждение в области ядерной физики и атомной энергетики. Институт был создан в 1970 г. на базе ядерных отделов Института физики АН УССР.

Основателем и первым директором института был академик НАНУ *Митрофан Васильевич Пасечник*. Позже учреждение возглавляли академик НАНУ О. Ф. Немец, академик НАНУ И. Н. Вишневский, с 2015 г. директор института — член-корреспондент НАНУ *Василий Иванович Слисенко*.

Основные направления работы института — фундаментальные и прикладные исследования по ядерной физике низких и средних энергий, физике реакторов, теории ядра, ядерной спектроскопии, ядерной электронике, радиационной физике, термоядерному синтезу, физике плазмы, по взаимодействию нейтронов, протонов, дейтронов, альфа-частиц и тяжелых ядер с ядрами почти всех элементов Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева.

В институте сложились известные научные школы: нейтронной физики, физики ядерных реакций с заряженными частицами, микроскопической теории ядра, ядерной спектроскопии, астрофизики элементарных частиц.

Научные сотрудники института сыграли огромную роль в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

## § 27. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА УКРАИНЫ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Большое преимущество ядерного топлива в сравнении с традиционным (газ, нефть, уголь) заключается в том, что его энергетическая эффективность в миллионы раз выше (в 2 млн раз выше, чем нефти, в 3 млн раз выше, чем угля). К тому же его сжигание не требует кислорода. Однако использование ядерного топлива связано с рядом сложностей.



**Рис. 27.1.** ТВЭЛ (тепловыделяющий элемент) — часть реактора; устройство, в котором содержится ядерное топливо (таблетки диоксида Урана)

### 1 Узнаём о ядерном цикле

Чтобы получить килограмм топлива с низкой энергетической эффективностью, например килограмм дров, достаточно сходить в лес. А вот чтобы получить килограмм ядерного топлива, нужно создать целую технологическую цепочку. Кроме того, после сгорания дров пепел можно просто разбросать. А что делать с ТВЭЛами (рис. 27.1), отработавшими свой ресурс? Ведь именно в ТВЭЛх происходит цепная ядерная реакция, и потому они содержат огромное количество радиоактивных «осколков» с длительными периодами полураспада.

Последовательность операций, связанных с добычей ядерного топлива из руды, изготовлением ТВЭЛов, использованием ТВЭЛов на атомных электростанциях и дальнейшей переработкой радиоактивных отходов, называют **ядерным циклом** (рис. 27.2).



**Рис. 27.2.** Схема ядерного цикла

По запасам урановой руды Украина занимает 11-е место в мире. Этих запасов хватит на несколько столетий. Но чтобы переработать руду в ядерное топливо, изготовить ТВЭЛы, необходима специализированная промышленность (цепочка взаимосвязанных производств), которой Украина в полном объеме не имеет. Так, на украинских атомных электростанциях используются зарубежные ТВЭЛы.

После того как в ТВЭЛе распадается определенная часть ядерного топлива (физики говорят: «ТВЭЛ выгорел»), его заменяют новым. ТВЭЛы, отработавшие свой ресурс, очень радиоактивны, поэтому их в специальных контейнерах размещают глубоко под землей, где они должны храниться сотни лет.

На сегодня в Украине только Запорожская атомная электростанция (рис. 27.3) имеет



хранилище для отработанных ТВЭЛов. ТВЭЛы с других атомных электростанций вывозят на хранение в Россию, и это стоит достаточно дорого. Сейчас высказываются намерения построить хранилище для отработанных ТВЭЛов в Чернобыльской 30-километровой зоне, ведь эта территория еще долго не будет пригодна для жизни людей. К тому же места для хранения ТВЭЛов можно предоставлять и другим странам.

**?** Подумайте над аргументами «за» строительство такого хранилища и «против».

## 2 Узнаём об атомной энергетике Украины

Украина относится к тем странам, в которых благодаря высоким технологиям, высококвалифицированным инженерам и ученым создана атомная энергетика. В стране работают четыре атомные электростанции: Запорожская, Ровенская, Южно-Украинская, Хмельницкая (рис. 27.3–27.6). На этих АЭС действуют 15 атомных энергоблоков общей мощностью 13 580 МВт. На АЭС приходится около половины производимой в стране электроэнергии.

АЭС обслуживаются многотысячными коллективами высококвалифицированных специалистов. Фактически вокруг каждой украинской АЭС вырос небольшой город.

Наличие в Украине источников электроэнергии, работающих на ядерном топливе, безусловно, смягчает все больший дефицит «обычных» энергоносителей: газа, нефти, каменного угля.

Когда речь идет об АЭС, опасения обычного гражданина связаны со словом «радиация». Однако исследования показывают, что наибольшее воздействие радиации на человека происходит за счет ее естественных источников, во время медицинских исследований и лечения. Радиация, связанная с «нормальным» развитием атомной энергетики, составляет лишь малую часть радиации, вызванной деятельностью человека. Но, к сожалению, история человечества уже знает несколько случаев аномального развития событий на ядерных реакторах, при этом последствия были катастрофичны.



**Рис. 27.3.** Запорожская АЭС — крупнейшая атомная электростанция Европы, на которой работает 6 атомных энергоблоков



**Рис. 27.4.** Ровенская АЭС имеет 4 атомных энергоблока



**Рис. 27.5.** Южно-Украинская АЭС имеет 3 атомных энергоблока



**Рис. 27.6.** Хмельницкая АЭС имеет 2 атомных энергоблока

### 3 Вспоминаем историю Чернобыльской трагедии

26 апреля 1986 г. — трагическая дата в истории Украины. Именно в этот день произошел взрыв на 4-м энергоблоке Чернобыльской атомной электростанции (рис. 27.7). Руководство станции дало согласие на работу ядерного реактора в режиме переменной мощности, что не было предусмотрено его конструкцией. В результате случилось неконтролируемое выделение ядерной энергии внутри реактора и произошел взрыв, вызвавший пожар на 4-м энергоблоке и катастрофический выброс радиоактивных веществ. Корпус реактора начал работать как огромная печь, выбрасывая радиоактивный дым в атмосферу. Ветер разнес этот дым на сотни и тысячи километров (повышение уровня радиации было зафиксировано даже в Швеции). В ликвидации аварии на ЧАЭС принимали участие специалисты всех республик Советского Союза.

Особую роль в уменьшении масштабов трагедии сыграли пожарные. Ценой своих жизней они предотвратили распространение пожара на другие реакторы Чернобыльской АЭС.

С катастрофой таких масштабов человечество раньше не сталкивалось, поэтому выбросы радиоактивных веществ не удалось остановить быстро — они продолжались десять дней. В результате целые регионы Украины, Беларуси, России оказались радиационно загрязненными, а из 30-километровой зоны вокруг станции было эвакуировано все население.

Позднее над разрушенным реактором был построен саркофаг — бетонная конструкция, защищающая от дальнейшего распространения радиационного загрязнения (рис. 27.8). Сегодня все энергоблоки Чернобыльской АЭС выведены из эксплуатации; совместно с международными организациями Украина построила еще один саркофаг, более совершенный. После трагедии прошло более 30 лет, но последствия радиационного загрязнения, особенно в зоне Чернобыльской АЭС, ощутимы до сих пор.

Подобная по масштабам катастрофа случилась в 2011 г. в Японии, на атомной электростанции «Фукусима-1». Вследствие землетрясения и цунами прекратили работать насосы, перекачивающие теплоноситель. Произошли



**Рис. 27.7.** Четвертый энергоблок Чернобыльской атомной электростанции до взрыва (а) и после взрыва (б)



**Рис. 27.8.**  
Саркофаг над  
4-м энергоблоком  
Чернобыльской  
АЭС

перегрев и повреждение атомного реактора, и радиационное вещество загрязнило окружающую среду.

Таким образом, сейчас человечество оказалось перед дилеммой: постепенное истощение традиционных энергоносителей вроде бы подталкивает к развитию атомной энергетики, но в то же время от ужасных аварий не застрахованы даже такие технологически развитые страны, как Япония. Правительство Германии сделало свой выбор и запретило развитие атомной энергетики в стране.

**?** А каково ваше мнение по этому вопросу? Подумайте над аргументами «за» и «против».



### Подводим итоги

Последовательность операций, связанных с добычей ядерного топлива из руды, изготовлением ТВЭЛов, использованием ТВЭЛов на атомных электростанциях и дальнейшей переработкой радиоактивных отходов, называют ядерным циклом.

Сейчас в Украине работают четыре атомные электростанции общей мощностью 13 580 МВт. На АЭС приходится около половины электроэнергии, производимой в стране. Если АЭС работают «нормально» (отработанные ТВЭЛы надежно хранятся в хранилищах, не происходит сбоев в работе реактора, предприняты все меры, предусмотренные нормативными документами), то они почти не оказывают радиационного воздействия на окружающую среду.

26 апреля 1986 г. произошла Чернобыльская катастрофа — взрыв на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС. Взрыв вызвал крупнейшее в мире радиационное заражение местности, в частности больших территорий в Украине, Беларуси и России. Последствия этого заражения ощутимы до сих пор. Подобная по масштабам катастрофа случилась в 2011 г. на атомной электростанции «Фукусима-1» (Япония).



### Контрольные вопросы

1. Перечислите преимущества и недостатки использования ядерного топлива.
2. Какова последовательность операций ядерного цикла?
3. Назовите атомные электростанции Украины. Какова их общая мощность?
4. Что вы знаете о Чернобыльской трагедии?

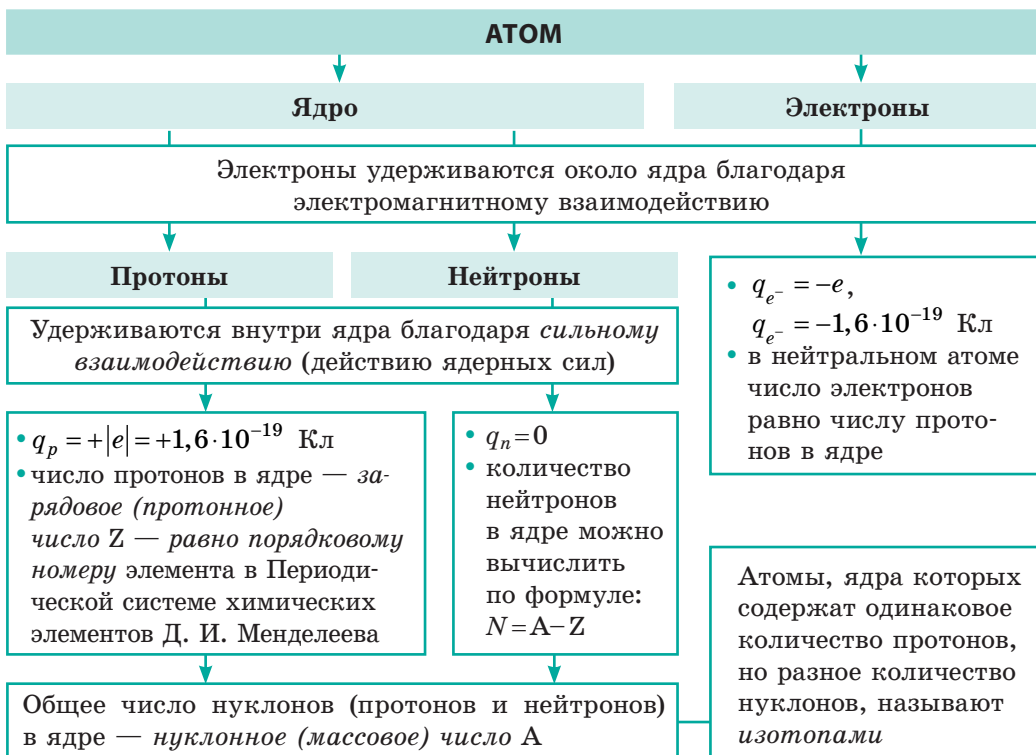
### Упражнение № 27

1. На Хмельницкой АЭС установлены реакторы типа ВВЭР-440 (электрическая мощность — 440 МВт), тепловая мощность которых равна 1375 МВт. Определите КПД реакторов этого типа.
2. На двух блоках Ровенской АЭС установлены реакторы типа ВВЭР-440 (электрическая мощность — 440 МВт), а еще на двух блоках — реакторы типа ВВЭР-1000 (электрическая мощность — 1000 МВт). Сколько энергии (в кВт·ч) может выработать Ровенская АЭС за сутки, работая на полную мощность?
3. Сколько энергии за сутки вырабатывает Запорожская АЭС, если один из ее блоков находится на плановом ремонте, а остальные работают на полную мощность? Тепловая мощность каждого реактора на АЭС равна 3000 МВт, КПД — 33,3 %.
4. Сколько килограммов Урана-235 ежедневно сжигают реакторы Южно-Украинской АЭС, если тепловая мощность каждого реактора равна 3000 МВт? При делении одного ядра Урана-235 выделяется  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж энергии, которая полностью передается теплоносителю (воде).
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте о перспективах развития атомной энергетики Украины.

## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА IV

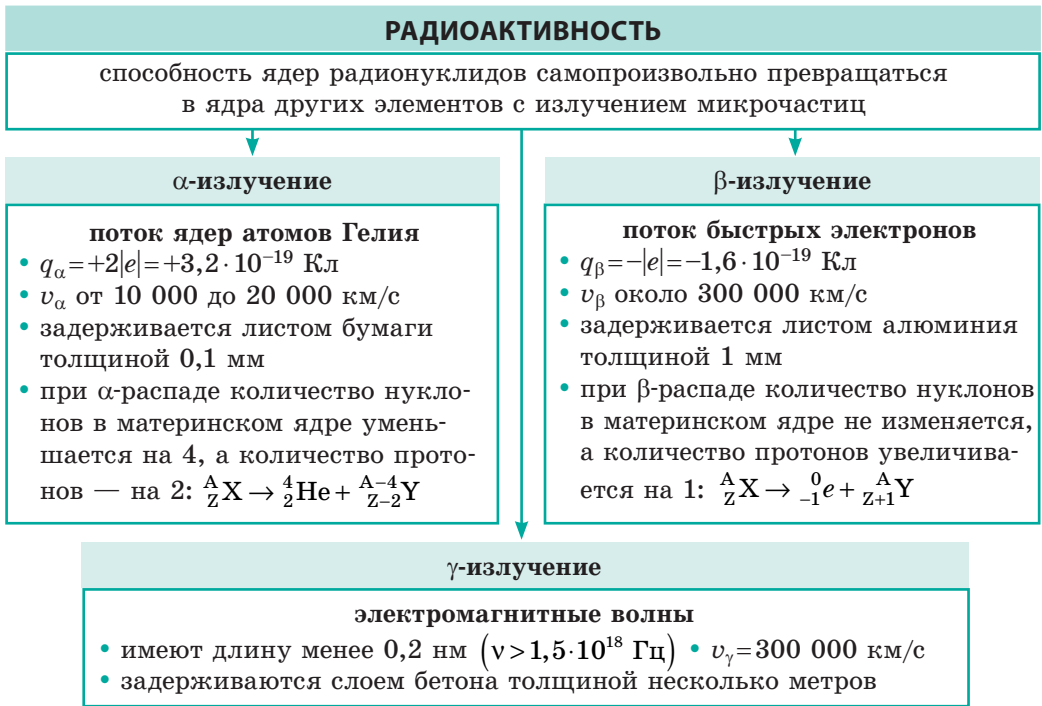
### «Физика атома и атомного ядра. Физические основы атомной энергетики»

1. Изучая раздел IV, вы вспомнили *строение атома и атомного ядра*, узнали о *ядерных силах*.





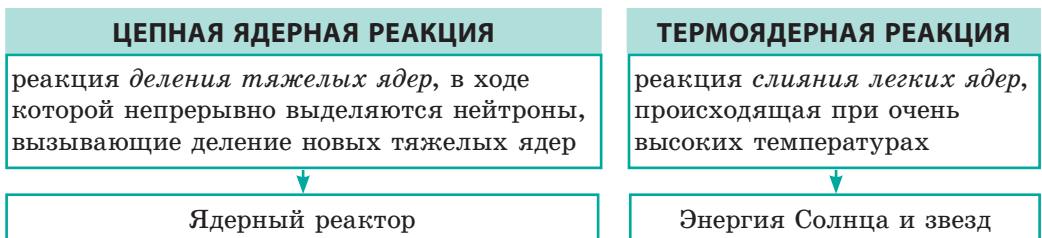
2. Вы узнали, как было открыто явление радиоактивности, выяснили природу радиоактивного излучения.



3. Вы ознакомились с физическими величинами, характеризующими радиоактивное излучение, радионуклиды и радиоактивные образцы.

Физическая величина	Формула для вычисления	Единица		Соотношение между единицами
		в СИ	внесистемная	
Активность образца	$A = \lambda N$	беккерель (Бк)	кюри (Ки)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Поглощенная доза	$D = W / m$	грей (Гр)	рад (рад)	1 рад = 0,01 Гр
Эквивалентная доза	$H = KD$	зиверт (Зв)	бэр (бэр)	1 бэр = 0,01 Зв

4. Вы выяснили, что вследствие поглощения нейтрона тяжелым ядром может произойти самопроизвольное деление ядра, сопровождающееся выделением энергии, и что реакция синтеза легких ядер тоже сопровождается выделением энергии.





1. (1 балл) В ядре атома Бериллия 4 протона и 5 нейтронов. Сколько электронов в атоме Бериллия?

а) 1 электрон;                      в) 5 электронов;  
б) 4 электрона;                  г) 9 электронов.
2. (1 балл) В ядре химического элемента 33 протона и 43 нейтрона. Что это за элемент?

а) Технеций;        б) Арсен;              в) Уран;              г) Аурум.
3. (1 балл) В результате опытов с  $\alpha$ -частицами Э. Резерфорд:

а) предложил нейтронно-протонную модель атомного ядра;  
б) объяснил явление радиоактивности;  
в) объяснил механизм цепной ядерной реакции;  
г) предложил ядерную модель строения атома.
4. (1 балл) При  $\alpha$ -распаде ядра атома некоторого элемента образуется ядро атома элемента, который в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева расположен от исходного элемента:

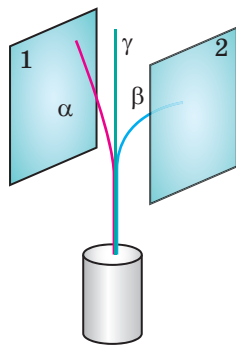
а) на две клетки влево;                      в) на одну клетку вправо;  
б) на две клетки вправо;                  г) на одну клетку влево.
5. (2 балла) Заряд ядра атома некоторого химического элемента составляет  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл. Какой это элемент?

а) Калий;              б) Гелий;              в) Литий;              г) Германий.
6. (2 балла) Пучок радиоактивного излучения разделяется, проходя между заряженными пластинами (см. рисунок). Каков знак заряда каждой пластины?

а) пластина 1 «+», пластина 2 «-»;  
б) пластина 1 «-», пластина 2 «+»;  
в) пластина 1 «+», пластина 2 «+»;  
г) пластина 1 «-», пластина 2 «-».
7. (2 балла) Какова активность радиоактивного образца, если каждый час в нем распадается  $7,2 \cdot 10^{10}$  ядер? Активность образца считайте неизменной.

а)  $7,2 \cdot 10^{10}$  Бк;    б)  $1,2 \cdot 10^9$  Бк;    в)  $3,6 \cdot 10^8$  Бк;    г)  $2 \cdot 10^7$  Бк.
8. (2 балла) Термоядерная реакция синтеза протекает при условии:

а) поглощения ядром нейтрона;    в) низкого давления;  
б) высокой температуры;              г) наличия тяжелых ядер.



9. (3 балла) Установите соответствие между количеством частиц и нуклидом.

1 70 электронов

2 57 протонов

3 57 нейтронов

4 70 нуклонов

А Неон  ${}_{10}^{21}\text{Ne}$

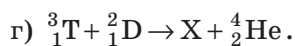
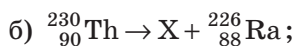
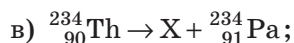
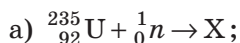
Б Галлий  ${}_{31}^{70}\text{Ga}$

В Рутений  ${}_{44}^{101}\text{Ru}$

Г Лантан  ${}_{57}^{140}\text{La}$

Д Иттербий  ${}_{70}^{173}\text{Yb}$

10. (3 балла) Какая из приведенных ядерных реакций является реакцией  $\beta$ -распада?



11. (3 балла) Радон  ${}_{86}^{222}\text{Rn}$  последовательно испытал два  $\alpha$ - и два  $\beta$ -распада. Ядро какого элемента стало результатом этих распадов?

12. (3 балла) В образце содержится  $1,6 \cdot 10^{10}$  ядер изотопа Бисмута  ${}_{83}^{214}\text{Bi}$ , период полураспада которого 20 мин. Сколько ядер Бисмута останется в образце через час?

13. (3 балла) На данный момент времени в радиоактивном образце содержится  $2 \cdot 10^{-10}$  моль радия. Сколько ядер Радия распадется за следующую секунду? Постоянная радиоактивного распада Радия  $\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ .

14. (4 балла) Средняя доза излучения, поглощаемая человеком, работающим с рентгеновской установкой, равна 7 мкГр за 1 ч. Безопасно ли работать с этой установкой в течение 200 дней в год по 6 ч ежедневно, если предельно допустимая доза облучения равна 50 мГр в год? Известно, что естественный радиационный фон составляет 2 мГр в год.

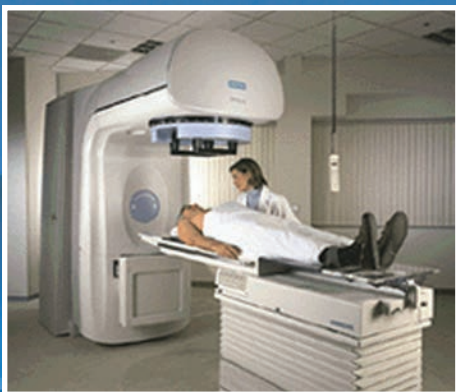
15. (4 балла) В результате трех  $\alpha$ - и двух  $\beta$ -распадов материнского ядра образовалось ядро Полония  ${}_{84}^{213}\text{Po}$ . Определите материнское ядро.

16. (4 балла) Определите, какую массу Урана-235 расходует за сутки атомная электростанция мощностью 2 ГВт, если ее КПД составляет 25 %, а при каждом делении ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выделяется  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж энергии.

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, и подсчитайте сумму баллов. Затем эту сумму разделите на три. Полученный результат будет соответствовать уровню ваших учебных достижений.



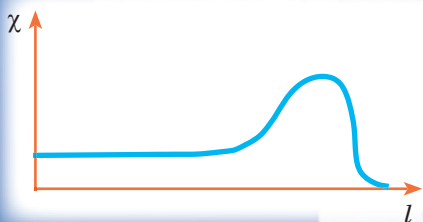
Тренировочные тестовые задания с компьютерной проверкой вы найдете на электронном образовательном ресурсе «Интерактивное обучение».



**Рис. 1.** Оборудование для радиационной терапии



**Рис. 2.** Во время процедур медицинский персонал находится в помещениях, защищенных от радиации



**Рис. 3.** Схематическое изображение зависимости степени повреждения тканей ( $\chi$ ) от глубины пробега ( $l$ ) протонов

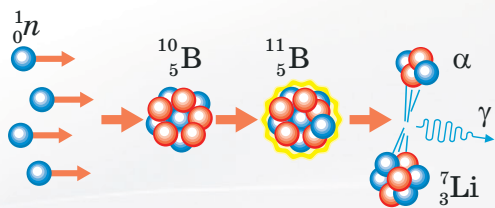
## От экспериментов Резерфорда до лечения заболеваний

Большинство жителей Украины, помня об аварии на Чернобыльской АЭС, с настороженностью относятся к слову «радиация». Закончив изучение раздела IV, вы узнали, что радиационное излучение — это, конечно, опасно. Но если соблюдать правила безопасности, контролировать уровень радиационного фона, своевременно принимать необходимые меры, то опасность можно уменьшить.

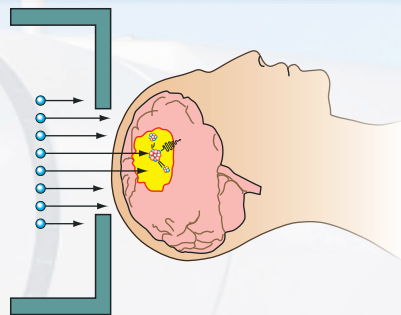
А может ли радиация быть полезной для организма? Оказывается, при некоторых заболеваниях, чтобы сохранить пациенту жизнь, медики вынуждены фактически наносить ему вред. Так, самой распространенной формой радиационной терапии является облучение пациента  $\gamma$ -лучами, проникающая способность которых достаточно высока (рис. 1, 2). Но при облучении больного внутреннего органа облучаются и здоровые части тела.

Естественным было стремление физиков решить эту проблему. Первое решение — применение другого типа излучения. Оказалось, что ускоренные до больших скоростей протоны имеют определенные преимущества перед  $\gamma$ -излучением. Известно, что протоны максимально повреждают места вблизи своей остановки, а на других участках траектории уровень повреждений значительно ниже (рис. 3). Изменяя энергию протонов, можно изменять места их остановки так, чтобы эти места приходились на больные клетки. Тогда, как видно из рис. 3, уровень повреждения здоровых тканей будет значительно ниже, чем больных. Причем доза облучения





**Рис. 4.** Схема ядерных реакций при попадании нейтрона в ядро Бора



**Рис. 5.** Схема проведения БНЗТ при онкозаболеваниях мозга

участка «до пика» в десятки раз ниже, а «после пика» и вовсе равна нулю. К сожалению, высокая стоимость использования ускорителя протонов не позволяет сделать данный метод массовым.

Еще один способ облучения больных тканей — *бор-нейтрон-захватывающая терапия (БНЗТ)* — был предложен сравнительно недавно. Большое преимущество БНЗТ — в ее точности. Эту терапию можно сравнить с «агентом 007», безошибочно и точно выполняющим свое задание.

Идея БНЗТ заключается в следующем. Ключевым в терапии является *ядро атома Бора*. Именно оно, как гениальный вратарь, умеет «ловить» нейтроны намного лучше, чем любые другие ядра. Поэтому при облучении тканей нейтронами ядро Бора сумеет «поймать» нейтрон, даже если их будет пролетать очень мало. Ядра же других элементов практически не заметят этого облучения, то есть вред будет сведен к минимуму.

После того как ядро Бора «поймает» нейтрон, оно претерпевает радиоактивные превращения и распадается на ядро Лития и  $\alpha$ -частицу (рис. 4), обладающие кинетической энергией, которая способна разрушить только одну клетку. Следовательно, если доставить ядро Бора непосредственно в больную клетку, то после «взрыва» только она и будет разрушена (рис. 5). Доставку ядер Бора осуществляют специальные типы лекарственных препаратов.

## Ориентировочные темы проектов

1. Работа бытового дозиметра.
2. Составление радиационной карты региона.
3. Радиологический анализ местных пищевых продуктов.
4. Экологические проблемы атомной энергетики.
5. Расщепление атома: ящик Пандоры или огонь Прометея?
6. Будущее Солнца и других звезд.

## Темы рефератов и сообщений

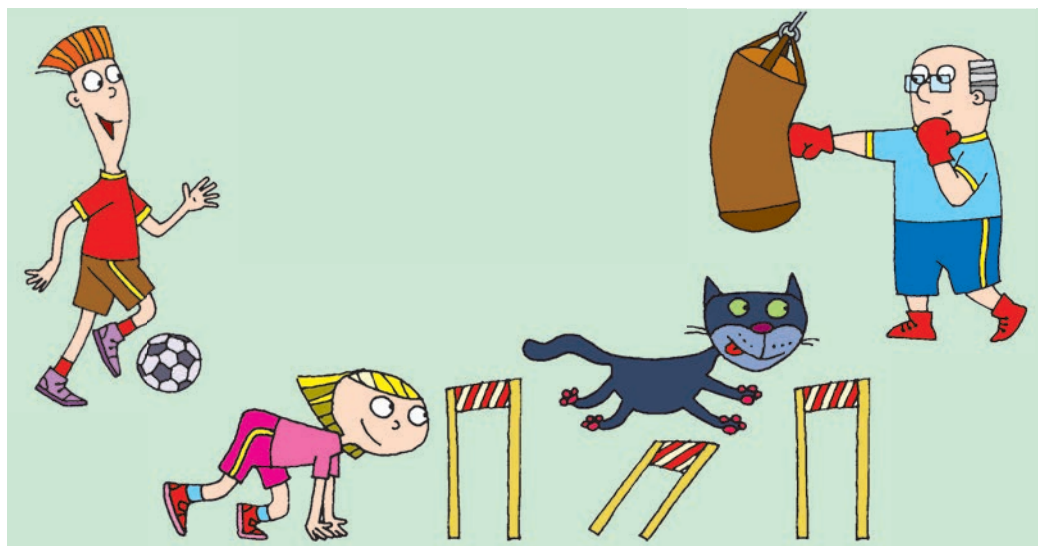
1. Большой адронный коллайдер — путь к изучению строения Вселенной.
2. История атома: от Демокрита до Резерфорда.
3. Кирпичики материи, или Что такое кварки.
4. Научный подвиг Пьера и Марии Кюри (история открытия Радия).
5. Как Э. Резерфорд установил природу  $\alpha$ -частиц.
6. История создания ядерного реактора.
7. Первые атомные электростанции.
8. Организация безопасности атомных реакторов.
9. Чернобыль и «Фукусима» — две крупнейшие ядерные катастрофы: что у них общее, в чем отличие.
10. Термоядерный реактор — реактор будущего.
11. Драма идей: история атомной бомбы.
12. История получения искусственных радиоактивных изотопов.
13. Где и как применяют искусственные радиоактивные изотопы.
14. Ядерно-физические методы изучения возраста археологических находок.
15. Что такое радоновые ванны.
16. Естественная радиоактивность: безопасная или опасная.
17. Хронология атомной эры.
18. Атомные электростанции Украины.
19. Мировая атомная энергетика.



# РАЗДЕЛ V

## ДВИЖЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

- Вы можете вычислить пройденный телом путь, если оно движется с неизменной скоростью, а теперь узнаете, как определить путь, если тело замедляет или, наоборот, ускоряет свое движение
- Вы наверняка слышали пословицу «Как аукнется, так и откликнется», а теперь узнаете, какой закон Ньютона можно сформулировать именно так
- Вы знаете, что при ходьбе отталкиваетесь от поверхности дороги, а теперь узнаете, от чего отталкивается ракета, двигаясь в космическом пространстве
- Вы знаете, что скорость движения автомобиля измеряется спидометром, а теперь узнаете, как изготовить устройство для измерения скорости движения стрелы
- Вы знаете о законе сохранения энергии, а теперь узнаете о законе сохранения импульса



## § 28. РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ. СКОРОСТЬ РАВНОУСКОРЕННОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Изучая физику в 7 классе, вы узнали о механическом движении, ознакомились с простейшей его разновидностью — равномерным прямолинейным движением. Раздел механики, который изучает движение тел и при этом не рассматривает причины, которыми это движение вызвано, называют **кинематикой** (от греч. «кинематос» — движение). Мы продолжим изучать кинематику, и сегодня вы узнаете о равноускоренном прямолинейном движении и физических величинах, его характеризующих.

1

### Повторяем основные понятия кинематики

**Механическое движение** — это изменение со временем положения тела в пространстве относительно других тел.

?

Рассмотрите рис. 28.1. Относительно каких тел движутся тела? Относительно каких тел они находятся в состоянии покоя? Почему механическое движение называют относительным?

Описывая механическое движение тела, мы, как правило, не рассматривали движение отдельных точек тела, а обращались к его физической модели — *материальной точке*. И далее, решая задачи на механическое движение тела, будем считать тело материальной точкой.

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

?

В каком случае тела на рис. 28.1 можно считать материальными точками?

В зависимости от формы **траектории** различают *криволинейное* и *прямолинейное* движения. Длина **траектории** равна пути, который преодолело тело. **Путь**  $l$  — это *скалярная* физическая величина. А вот **перемещение**  $\vec{s}$  — направленный отрезок прямой, соединяющий начальное и конечное положения тела, — это *векторная* физическая величина (рис. 28.2).

Механическое движение называют **равномерным прямолинейным**, если тело за любые равные интервалы времени осуществляет одинаковые перемещения. Скорость  $\vec{v}$  такого движения не изменяется ни по значению, ни по направлению; направление вектора скорости совпадает с направлением перемещения ( $\vec{v} \uparrow \vec{s}$ ); модуль скорости вычисляют по формуле  $v = \frac{s}{t}$ .



Рис. 28.1. Некоторые примеры механического движения тел

## 2 Даём определение ускорения

Проведем простой опыт с длинным желобом и шариком. Приподняв один край желоба, положим на него шарик и отпустим. Шарик начнет скатываться (рис. 28.3, а). Видим: чем дальше будет шарик от верхнего края желоба, тем большее расстояние он будет преодолевать за 1 с. Это означает, что скорость движения шарика со временем увеличивается.

Повторим опыт, увеличив угол наклона желоба (рис. 28.3, б), — в этом случае скорость движения шарика будет увеличиваться еще быстрее. Говорят, что шарик движется с **большим ускорением**.

**Ускорение** — это векторная физическая величина, которая характеризует скорость изменения скорости движения тела и равна отношению изменения скорости движения тела к интервалу времени, за который это изменение произошло:

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

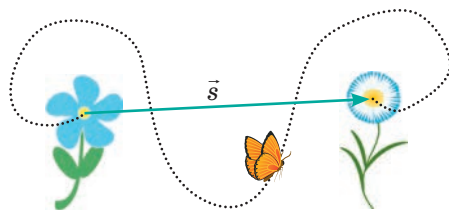
где  $\vec{a}$  — ускорение движения тела;  $\vec{v}_0$  — начальная скорость (скорость движения тела в момент начала отсчета времени);  $\vec{v}$  — скорость движения тела через интервал времени  $t$ .

Чтобы избежать сложных математических действий с векторами, будем пользоваться данной формулой, записанной в проекциях на ось координат (например, на ось  $OX$ ):

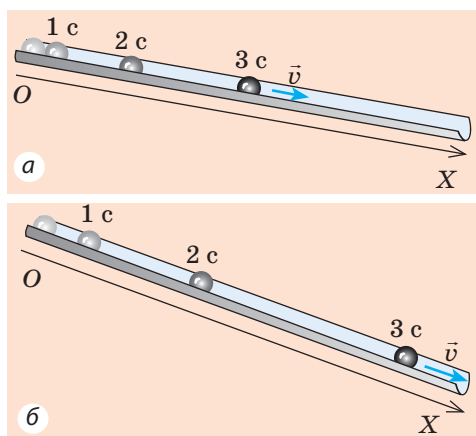
$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

**Единица ускорения в СИ — метр на секунду в квадрате:**

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

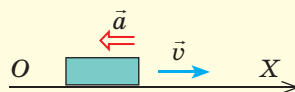


**Рис. 28.2.** Перемещение показывает, в каком направлении и на какое расстояние переместилось тело за некоторый интервал времени



**Рис. 28.3.** Положение шарика, скатывающегося по желобу, через 1 с, 2 с и 3 с после начала движения

### Повторяем математику



- Если направление вектора совпадает с направлением оси координат, то проекция вектора на эту ось равна модулю вектора.
- Если направление вектора противоположно направлению оси координат, то проекция вектора на эту ось равна модулю вектора, взятому со знаком «-».

Для случая, представленного на рисунке:  $a_x = -a$ ;  $v_x = v$ .

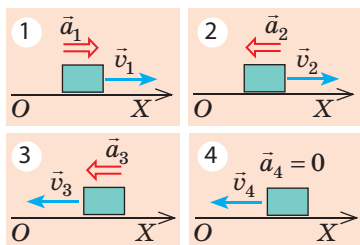


Рис. 28.4. К заданию в § 28



Рис. 28.5. Идя в школу, вы то быстрее, то медленнее увеличиваете скорость своего движения, иногда замедляете скорость, а какие-то интервалы времени движетесь с неизменной скоростью

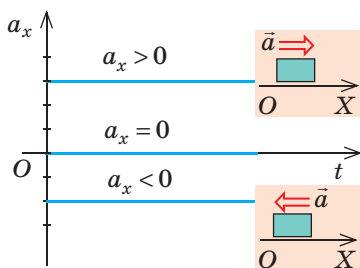


Рис. 28.6. График зависимости  $a_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения

Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей сил, которые действуют на тело.

- Если ускорение направлено в сторону движения тела ( $\vec{a} \uparrow \vec{v}$ ), скорость движения тела увеличивается (равнодействующая «подталкивает» и разгоняет тело).
- Если ускорение направлено противоположно движению тела ( $\vec{a} \uparrow \vec{v}$ ), скорость движения тела уменьшается (равнодействующая «мешает» движению и замедляет его).
- Если  $a=0$ , то силы, действующие на тело, скомпенсированы и тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя.

**?** Для каждого случая (рис. 28.4) определите, увеличивается или уменьшается скорость движения тела в данный момент времени. Приведите примеры таких движений.

### 3 Узнаём, какое движение называют равноускоренным прямолинейным

Если тело движется неравномерно, его скорость непрерывно изменяется, причем обычно за равные интервалы времени скорость движения тела изменяется неодинаково (рис. 28.5).

В этом учебном году вы рассмотрите простейший вид ускоренного движения — *равноускоренное прямолинейное движение* и узнаете, что такое движение бывает, когда равнодействующая сил, приложенных к телу, неизменна.

**Равноускоренное прямолинейное движение** — это движение, при котором скорость движения тела за любые равные интервалы времени изменяется одинаково.

Иначе говоря, *равноускоренное прямолинейное движение* — это движение, при котором тело движется по прямолинейной траектории с неизменным ускорением. Во время такого движения ускорение тела не изменяется со временем, поэтому график зависимости  $a_x(t)$  представляет собой отрезок прямой, параллельной оси времени (рис. 28.6).

#### 4 Определяем скорость равноускоренного прямолинейного движения

Если тело движется равноускоренно, скорость его движения все время изменяется. Поэтому далее, говоря о скорости равноускоренного движения тела, мы будем иметь в виду его *мгновенную скорость*.

**Мгновенная скорость** — это скорость движения тела в данный момент времени, скорость движения в данной точке траектории.

Для вычисления скорости равноускоренного прямолинейного движения тела воспользуемся определением ускорения. Поскольку  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ , то

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

Будем использовать эту формулу, записанную в проекциях на ось  $OX$ , которую направим вдоль траектории движения тела:

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

Если задано уравнение проекции скорости движения тела, то заданы и начальная скорость ( $\vec{v}_0$ ), и ускорение ( $\vec{a}$ ) движения тела.

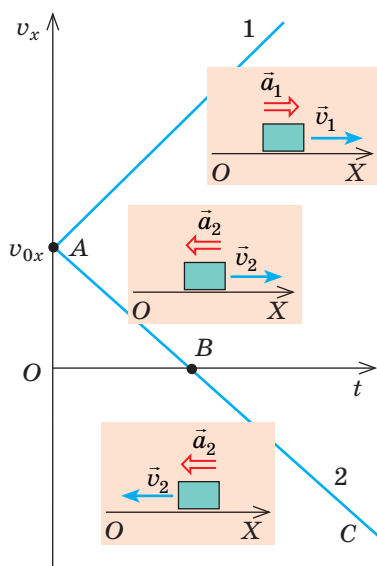
Например, уравнение проекции скорости имеет вид:  $v_x = 20 - 3t$ . Это означает, что  $v_{0x} = 20$  м/с (начальная скорость равна 20 м/с, а ее направление совпадает с направлением оси  $OX$ );  $a_x = -3$  м/с<sup>2</sup> (ускорение равно 3 м/с<sup>2</sup>, а знак «-» показывает, что направление ускорения противоположно направлению оси  $OX$ ).

**?** Определите начальную скорость и ускорение движения тела, если уравнение проекции скорости имеет вид:  $v_x = -10 + 2t$ .

Зависимость  $v_x = v_{0x} + a_x t$  линейна, поэтому график проекции скорости — график зависимости  $v_x(t)$  — это отрезок прямой, наклоненной под некоторым углом к оси времени (рис. 28.7). В момент  $t = 0$  скорость движения тела равна его начальной скорости ( $v_x = v_{0x}$ ), то есть график  $v_x(t)$  начинается на оси ординат в точке с координатами  $(0; v_{0x})$ .

Если проекция ускорения положительна ( $a_x > 0$ ), то график скорости поднимается (график 1 на рис. 28.7). Если проекция ускорения отрицательна ( $a_x < 0$ ), то график скорости опускается (график 2 на рис. 28.7).

**Обратите внимание:** точка  $B$  графика 2 на рис. 28.7 — это **точка разворота**.



**Рис. 28.7.** Графики зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения.

Тело 1 все время увеличивает скорость своего движения:  $\vec{a}_1 \uparrow \vec{v}_1$ . Тело 2 сначала замедляет свое движение:  $\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$  (участок  $AB$ ), затем останавливается (точка  $B$ ), после чего набирает скорость, двигаясь в противоположном направлении, так как  $\vec{a}_2 \uparrow \vec{v}_2$  (участок  $BC$ ).

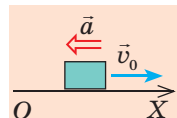


## 5 Учимся решать задачи

**Задача 1.** Автомобиль, движущийся со скоростью 90 км/ч, останавливается перед светофором. Определите время торможения автомобиля, считая его движение равноускоренным прямолинейным с ускорением 5 м/с<sup>2</sup>.

*Анализ физической проблемы.* Автомобиль останавливается, значит, его конечная скорость равна нулю ( $v = 0$ ), а направление вектора ускорения противоположно направлению скорости движения.

Выполним пояснительный рисунок, на котором укажем ось координат (ее направление пусть совпадает с направлением движения), направление начальной скорости и направление ускорения движения автомобиля.



*Дано:*

$$\begin{aligned} v_0 &= 90 \text{ км/ч} = \\ &= 25 \text{ м/с} \\ a &= 5 \text{ м/с}^2 \\ v &= 0 \end{aligned}$$

*Найти:*  
 $t$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Движение равноускоренное, поэтому  $v_x = v_{0x} + a_x t$ .

Воспользовавшись рисунком, конкретизируем это уравнение:  $v_{0x} = v_0$ ,  $a_x = -a$ ,  $v_x = 0$ . Следовательно:

$$0 = v_0 - at \Rightarrow v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[t] = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с} \cdot \text{м}} = \text{с}; \quad t = \frac{25}{5} = 5 \text{ (с)}.$$

*Ответ:*  $t = 5 \text{ с}$ .

**Задача 2.** Тело двигалось прямолинейно вдоль оси  $OX$ . По графику зависимости  $v_x(t)$  (рис. 28.8): 1) опишите характер движения тела; 2) запишите уравнение проекции скорости движения тела; 3) постройте график зависимости проекции ускорения движения тела от времени.

*Анализ физической проблемы, решение*

1. График  $v_x(t)$  — прямая, значит, движение тела равноускоренное.

Первые 4 с тело двигалось в направлении, противоположном направлению оси  $OX$  (проекция скорости отрицательна), скорость его движения уменьшалась. В момент  $t = 4$  тело остановилось, а затем начало движение в обратном направлении (знак проекции скорости сменился на противоположный). Следующие 3 с тело двигалось в направлении оси  $OX$ , скорость его движения увеличивалась.

2. Запишем уравнение проекции скорости движения в общем виде:

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

Конкретизируем это уравнение:

а) по графику найдем проекцию начальной скорости:  $v_{0x} = -8 \text{ м/с}$ ;

б) выберем на графике произвольную точку, например точку, которой соответствуют  $t = 4 \text{ с}$  и  $v_x = 0$ , и найдем проекцию ускорения:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} = \frac{0 - (-8 \text{ м/с})}{4 \text{ с}} = 2 \text{ м/с}^2;$$

в) полученные значения подставим в уравнение проекции скорости движения:  $v_x = -8 + 2t$ .

3. Ускорение тела неизменно ( $a_x = 2 \text{ м/с}^2$ ), поэтому график  $a_x(t)$  — прямая, параллельная оси времени и расположенная выше этой оси (рис. 28.9).

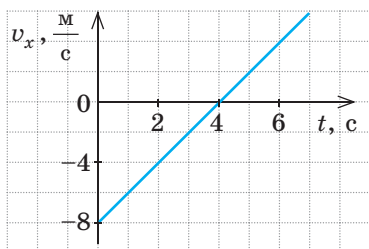


Рис. 28.8. К задаче 2 в § 28

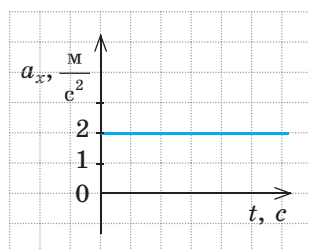


Рис. 28.9. К задаче 2 в § 28



### Подводим итоги

Равноускоренное прямолинейное движение — это такое движение, при котором скорость движения тела за любые равные интервалы времени изменяется одинаково.

Ускорение  $\vec{a}$  — это векторная физическая величина, которая характеризует скорость изменения скорости движения тела и равна отношению изменения скорости движения к интервалу времени, за который это изменение произошло:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ .

Единица ускорения в СИ — метр на секунду в квадрате ( $\text{м/с}^2$ ).

При равноускоренном прямолинейном движении:

- график проекции ускорения  $a_x(t)$  — прямая, параллельная оси времени;
- скорость движения изменяется линейно:  $v_x = v_{0x} + a_x t$ ;
- график проекции скорости движения  $v_x(t)$  — отрезок прямой, наклоненной под некоторым углом к оси времени.



### Контрольные вопросы

1. Какое движение называют равноускоренным прямолинейным? 2. Дайте определение ускорения. 3. Какова единица ускорения в СИ? 4. Какой вид имеет график зависимости  $a_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения? 5. Запишите уравнение зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения. Какой вид имеет график этой зависимости? 6. Как движется тело, если направление его ускорения: а) совпадает с направлением скорости движения? б) противоположно направлению скорости движения? Как движется тело, если его ускорение равно нулю?



### Упражнение № 28

1. Может ли тело двигаться с большой скоростью, но с малым ускорением?
2. С каким ускорением двигался тронувшийся с места автомобиль, если через 10 с после начала движения его скорость была равна 15 м/с?
3. Шарик толкнули вверх по наклонной плоскости, придав скорость 2 м/с. Определите скорость движения шарика через 0,5 с; через 1 с; через 1,5 с после начала движения, если ускорение движения шарика  $2 \text{ м/с}^2$ . Объясните полученные результаты.

4. При прямолинейном движении с неизменным ускорением  $0,2 \text{ м/с}^2$  велосипедист достиг скорости  $5 \text{ м/с}$  за  $25 \text{ с}$ . Какой была начальная скорость движения велосипедиста?
5. Вычислите, сколько времени требуется автобусу для изменения скорости движения от  $54 \text{ км/ч}$  до  $5 \text{ м/с}$ , если его ускорение неизменно и равно  $0,5 \text{ м/с}^2$ .
6. Даны уравнения проекции скорости движения для трех тел, движущихся вдоль оси  $OX$ : а)  $v_x = 2 + t$ ; б)  $v_x = -20 + 5t$ ; в)  $v_x = 10 - 3t$ . Все величины представлены в единицах СИ. Для каждого тела определите: 1) как двигалось тело; 2) каковы начальная скорость и ускорение движения тела; 3) если тело остановится, то через какое время.
7. На рис. 1 представлены графики зависимости  $a_x(t)$  для двух тел. Для каждого тела запишите уравнение и постройте график зависимости  $v_x(t)$ , если  $v_{01x} = -4 \text{ м/с}$ ,  $v_{02x} = 8 \text{ м/с}$ .
8. На рис. 2 представлены графики зависимости  $v_x(t)$  для четырех тел. Для каждого тела запишите уравнение проекции скорости движения, постройте график зависимости  $a_x(t)$ .
9. Тело двигалось равноускоренно длительное время. На рис. 3 представлен график зависимости  $v_x(t)$  для этого тела начиная с некоторого момента времени. Выясните время, когда тело изменило направление скорости своего движения.
10. По рис. 3 определите путь, пройденный телом за первые  $4 \text{ с}$  наблюдения.

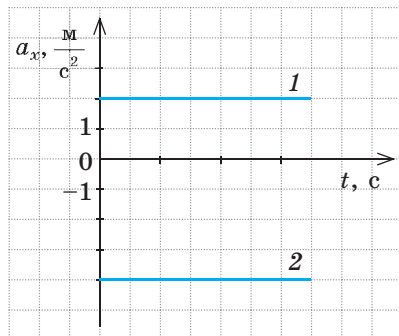


Рис. 1

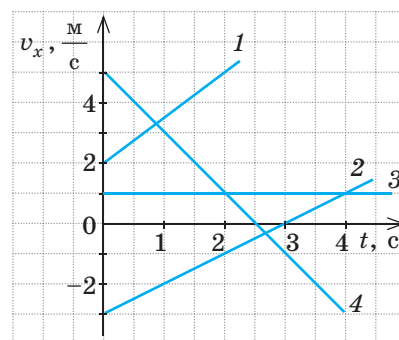


Рис. 2

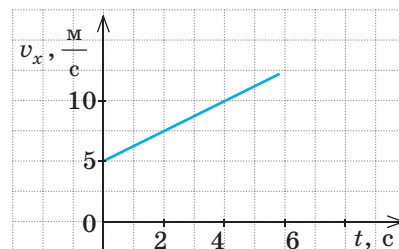


Рис. 3

## § 29. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ РАВНОУСКОРЕННОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ. УРАВНЕНИЕ КООРДИНАТЫ

Когда на дороге происходит авария, специалисты измеряют тормозной путь. Зачем? Чтобы определить скорость движения автомобиля в начале торможения и ускорение при торможении. Все это нужно для выяснения причин аварии: или водитель превысил скорость, или были неисправны тормоза, или с автомобилем все в порядке, а виноват нарушивший правила дорожного движения пешеход. Как, зная время торможения и тормозной путь, определить скорость и ускорение движения тела?

## 1 Узнаём о геометрическом смысле проекции перемещения

В 7 классе вы узнали, что для любого движения путь численно равен площади фигуры под графиком зависимости модуля скорости движения от времени наблюдения. Аналогичная ситуация и с определением проекции перемещения (рис. 29.1).

Получим формулу для вычисления проекции перемещения тела за интервал времени от  $t_1 = 0$  до  $t_2 = t$ . Рассмотрим равноускоренное прямолинейное движение, при котором начальная скорость и ускорение имеют одинаковое направление с осью  $OX$ . В этом случае график проекции скорости имеет вид, представленный на рис. 29.2, а проекция перемещения численно равна площади трапеции  $OABC$ :

$$S_{OABC} = \frac{OA + BC}{2} \cdot OC.$$

На графике отрезок  $OA$  соответствует проекции начальной скорости  $v_{0x}$ , отрезок  $BC$  — проекции конечной скорости  $v_x$ , а отрезок  $OC$  — интервалу времени  $t$ . Заменяя данные отрезки соответствующими физическими величинами и учитывая, что  $s_x = S_{OABC}$ , получим формулу для определения проекции перемещения:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t \quad (1)$$

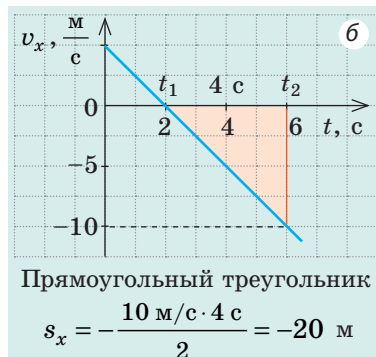
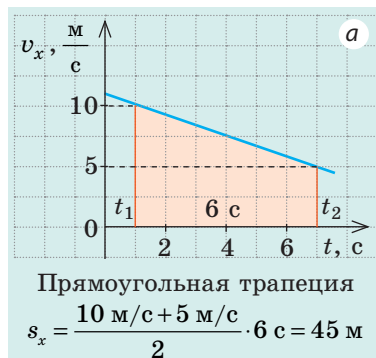
Формулу (1) применяют для описания любого равноускоренного прямолинейного движения.

**?** Определите перемещение тела, график движения которого представлен на рис. 29.1, б, за 2 с и за 4 с после начала отсчета времени. Поясните ответ.

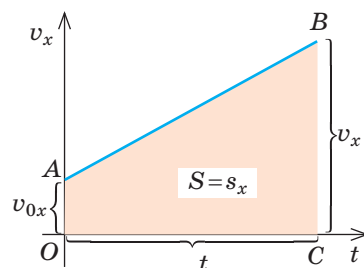
## 2 Записываем уравнение проекции перемещения

Исключим переменную  $v_x$  из формулы (1). Для этого вспомним, что при равноускоренном прямолинейном движении  $v_x = v_{0x} + a_x t$ . Подставив выражение для  $v_x$  в формулу (1), получим:

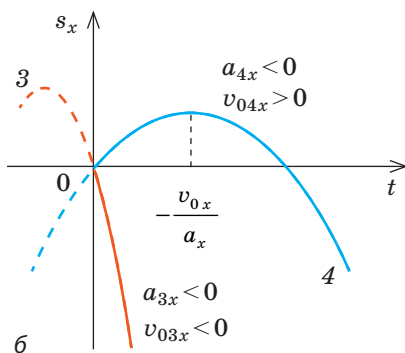
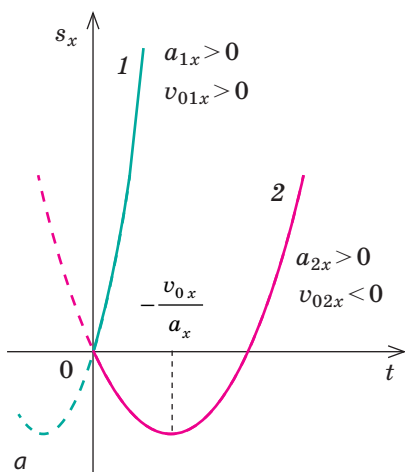
$$s_x = \frac{v_{0x} + v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = \frac{2v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2.$$



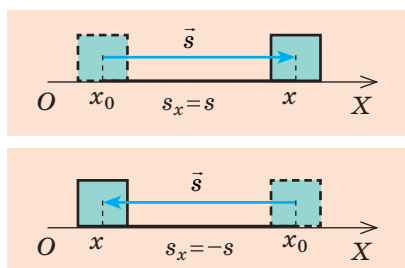
**Рис. 29.1.** Геометрический смысл перемещения: проекция перемещения численно равна площади фигуры, ограниченной графиком  $v_x(t)$ , осью времени и прямыми  $t=t_1$  и  $t=t_2$ .  $s_x > 0$ , если полученная фигура расположена над осью времени (а);  $s_x < 0$ , если полученная фигура расположена под осью времени (б)



**Рис. 29.2.** К выведению формулы проекции перемещения



**Рис. 29.3.** График проекции перемещения при равноускоренном прямолинейном движении — парабола, проходящая через начало координат: если  $a_x > 0$ , ветви параболы направлены вверх (а); если  $a_x < 0$ , ветви параболы направлены вниз (б)



**Рис. 29.4.** Выбор оси координат в случае прямолинейного движения

Таким образом, для равноускоренного прямолинейного движения получено **уравнение проекции перемещения**:

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

Поскольку величины  $v_{0x}$  и  $a_x$  не зависят от времени наблюдения, зависимость  $s_x(t)$  является *квадратичной*. Например, если  $v_{0x} = 2$  м/с, а  $a_x = -1$  м/с<sup>2</sup>, то уравнение  $s_x(t)$  будет иметь вид:  $s_x = 2t - 0,5t^2$ .

Итак, *график проекции перемещения* при равноускоренном прямолинейном движении — **парабола** (рис. 29.3), вершина которой соответствует точке разворота:

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

где  $t$  — время движения тела до разворота.

Воспользовавшись определением ускорения  $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$  и формулой  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ , можно получить еще одну формулу для вычисления проекции перемещения при равноускоренном прямолинейном движении:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x} \quad (3)$$

Формулой (3) удобно пользоваться, если в условии задачи не идет речь о времени движения тела и не нужно его определять.

**?** Выведите формулу (3) самостоятельно.

**Обратите внимание:** в каждой формуле (1–3) проекции  $v_x$ ,  $v_{0x}$  и  $a_x$  могут быть как положительными, так и отрицательными — в зависимости от того, как направлены векторы  $\vec{v}$ ,  $\vec{v}_0$  и  $\vec{a}$  относительно оси  $OX$ .

### 3 Записываем уравнение координаты

Одна из основных задач механики — определение положения тела (координат тела) в любой момент времени. Мы рассматриваем прямолинейное движение, поэтому достаточно выбрать одну ось координат (например, ось  $OX$ ), которую следует



направить вдоль движения тела (рис. 29.4). Из данного рисунка видим, что независимо от направления движения координату  $x$  тела можно определить по формуле:

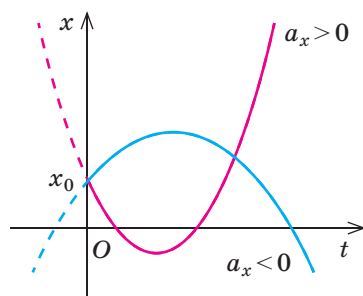
$$x = x_0 + s_x,$$

где  $x_0$  — начальная координата (координата тела в момент начала наблюдения);  $s_x$  — проекция перемещения.

Для равноускоренного прямолинейного движения  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$ , поэтому для такого движения **уравнение координаты** имеет вид:

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

Проанализировав последнее уравнение, делаем вывод, что зависимость  $x(t)$  — квадратичная, поэтому *график координаты — парабола* (рис. 29.5).



**Рис. 29.5.** При равноускоренном прямолинейном движении график зависимости координаты от времени — парабола, пересекающая ось  $x$  в точке  $x_0$

#### 4 Учимся решать задачи

Основные этапы решения задач на равноускоренное прямолинейное движение рассмотрим на примерах.

##### Последовательность действий

**1.** Внимательно прочитайте условие задачи. Определите, какие тела принимают участие в движении, каков характер движения тел, какие параметры движения известны.

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

**3.** Выполните пояснительный рисунок, на котором покажите ось координат, направления скорости движения, перемещения, начальной скорости движения, ускорения.

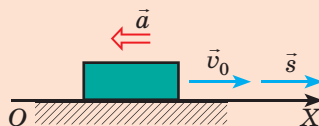
##### Пример решения задачи

**Задача 1.** После начала торможения поезд прошел до остановки 225 м. Какой была скорость движения поезда перед началом торможения? Считайте, что во время торможения ускорение поезда неизменно и равно  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

**Дано:**  $s = 225 \text{ м}$   
 $a = 0,5 \text{ м/с}^2$   
 $v = 0$

**Найти:**  $v_0$  — ?

На пояснительном рисунке направим ось  $OX$  в направлении движения поезда. Так как поезд уменьшает свою скорость, то  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$ .



4. Из формул, описывающих прямолинейное равноускоренное движение, выберите те, которые больше всего соответствуют 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.

Из условия задачи известны  $a$ ,  $v$  и  $s$ , требуется найти  $v_0$ . Все эти физические величины входят в формулу  $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ .

Направления перемещения и начальной скорости совпадают с направлением оси  $OX$ , поэтому  $s_x = s$ ,  $v_{0x} = v_0$ .

Направление ускорения противоположно направлению оси  $OX$ , поэтому  $a_x = -a$ . По условию конечная скорость  $v = 0$ .

Подставим полученные данные в формулу перемещения:  $s = \frac{0 - v_0^2}{-2a} = \frac{v_0^2}{2a}$ .

5. Решите задачу в общем виде.

Из формулы  $s = \frac{v_0^2}{2a}$  найдем  $v_0$  — начальную скорость движения:  $v_0^2 = 2as \Rightarrow v_0 = \sqrt{2as}$ .

6. Проверьте единицу, найдите значение искомой величины.

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v = \sqrt{2 \cdot 225 \cdot 0,5} = \sqrt{225} = 15 \text{ (м/с)}.$$

7. Запишите и проанализируйте результат.

$v_0 = 15 \text{ м/с} = 54 \text{ км/ч}$  — вполне реальная скорость движения для поезда.

8. Запишите ответ.

Ответ:  $v_0 = 54 \text{ км/ч}$ .

1. Внимательно прочитайте условие задачи. Выясните характер движения тел, какие параметры движения известны.

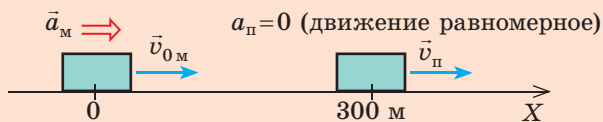
**Задача 2.** По прямолинейному участку дороги идет пешеход с постоянной скоростью  $2 \text{ м/с}$ . Его догоняет мотоцикл, который увеличивает свою скорость, двигаясь с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Через какое время мотоцикл обгонит пешехода, если на момент начала отсчета времени расстояние между ними было  $300 \text{ м}$ , а мотоцикл двигался со скоростью  $22 \text{ м/с}$ ? Какое расстояние проедет мотоцикл за это время?

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

$$\begin{aligned} \text{Дано: } v_{\text{п}} &= 2 \text{ м/с} \\ a_{\text{м}} &= 2 \text{ м/с}^2 \\ l &= 300 \text{ м} \\ v_{0\text{м}} &= 22 \text{ м/с} \end{aligned}$$

Найти:  $t$  — ?  $s_{\text{м}}$  — ?

3. Выполните пояснительный рисунок, на котором покажите ось координат, положения тел, направления ускорений и скоростей.



4. Запишите уравнение координаты в общем виде; воспользовавшись рисунком, конкретизируйте это уравнение для каждого тела.

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

Мотоцикл

Пешеход

$$\begin{aligned} x_0 &= 0, \\ v_{0x} &= 22 \text{ м/с}; \\ a_x &= 2 \text{ м/с}^2; \\ x_M &= 22t + t^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_0 &= 300 \text{ м}, \\ v_x &= 2 \text{ м/с}; \\ a &= 0; \\ x_{\Pi} &= 300 + 2t. \end{aligned}$$

5. Учтя, что в момент встречи (обгона) координаты тел одинаковы, получите квадратное уравнение.

$$x_M = x_{\Pi};$$

$$22t + t^2 = 300 + 2t;$$

$$22t + t^2 - 2t - 300 = 0 \Rightarrow t^2 + 20t - 300 = 0.$$

6. Решите полученное уравнение и найдите время встречи тел.

$$D = 20^2 + 4 \cdot 300 = 1600; \quad t_1 = \frac{-20 + 40}{2} = 10 \text{ (с)};$$

$$t_2 = \frac{-20 - 40}{2} = -30 \text{ (с)} \text{ — значение корня противоречит физическому смыслу.}$$

7. Вычислите координату тел в момент встречи.

$$x_M = x_{\Pi} = 300 + 2t = 300 + 2 \cdot 10 = 320 \text{ (м)}.$$

8. Найдите искомую величину и проанализируйте результат.

Мотоцикл был в точке с координатой  $x_{0M} = 0$ , а обогнал пешехода в точке с координатой  $x_M = 320$  м, значит, мотоцикл проехал расстояние 320 м. Пешеход за это время прошел всего 20 м. Это реальный результат.

9. Запишите ответ.

Ответ:  $t = 10$  с;  $s_M = 320$  м.



### Подводим итоги

Для равноускоренного прямолинейного движения тела:

- проекция перемещения численно равна площади фигуры под графиком проекции скорости движения — графиком зависимости  $v_x(t)$ :  $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ , — в этом состоит геометрический смысл перемещения;
- уравнение проекции перемещения имеет вид:  $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x}{2}t^2$  — это квадратичная функция, поэтому 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. С помощью каких формул можно найти проекцию перемещения  $s_x$  для равноускоренного прямолинейного движения? Выведите эти формулы. 2. Докажите, что график зависимости перемещения тела от времени наблюдения — парабола. Как направлены ее ветви? Какому моменту движения соответствует вершина параболы? 3. Запишите уравнение координаты для равноускоренного прямолинейного движения. Какие физические величины связывает это уравнение?



## Упражнение № 29

- Лыжник, движущийся со скоростью 1 м/с, начинает спускаться с горы. Определите длину спуска, если лыжник проехал его за 10 с. Считайте, что ускорение лыжника было неизменным и составляло 0,5 м/с<sup>2</sup>.
- Пассажирский поезд изменил свою скорость от 54 км/ч до 5 м/с. Определите расстояние, которое проехал поезд во время торможения, если ускорение поезда было неизменным и составляло 1 м/с<sup>2</sup>.
- Тормоза легкового автомобиля исправны, если при скорости 8 м/с его тормозной путь — 7,2 м. Определите время торможения и ускорение автомобиля.
- Уравнения координат двух тел, движущихся вдоль оси  $OX$ , имеют вид:  
 $x_1 = 8 - 2t + t^2$ ;  $x_2 = -2 - 5t + 2t^2$ .  
 1) Для каждого тела определите: а) характер движения; б) начальную координату; в) модуль и направление начальной скорости; г) ускорение.  
 2) Найдите время и координату встречи тел.  
 3) Для каждого тела запишите уравнения  $v_x(t)$  и  $s_x(t)$ , постройте графики проекций скорости и перемещения.

- На рис. 1 представлен график проекции скорости движения для некоторого тела. Определите путь и перемещение тела за 4 с от начала отсчета времени. Запишите уравнение координаты, если в момент времени  $t = 0$  тело было в точке с координатой  $-20$  м.
- Два автомобиля начали движение из одного пункта в одном направлении, причем второй автомобиль выехал на 20 с позже. Оба автомобиля движутся равноускоренно с ускорением 0,4 м/с<sup>2</sup>. Через какой интервал времени после начала движения первого автомобиля расстояние между автомобилями будет 240 м?

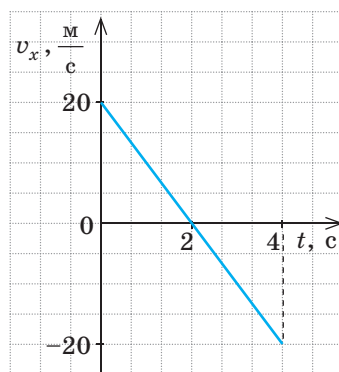


Рис. 1

- На рис. 2 представлен график зависимости координаты тела от времени его движения. Запишите уравнение координаты, если известно, что модуль ускорения 1,6 м/с<sup>2</sup>.



- Эскалатор в метро поднимается со скоростью 2,5 м/с. Может ли человек на эскалаторе находиться в состоянии покоя в системе отсчета, связанной с Землей? Если может, то при каких условиях? Можно ли при этих условиях движение человека считать движением по инерции? Обоснуйте свой ответ.

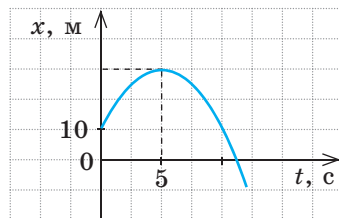


Рис. 2

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

Мы уже не раз упоминали гениального английского ученого *Исаака Ньютона* (1642–1727). За свои научные заслуги он даже получил рыцарское звание и титул лорда. «Природа для него была открытой книгой, которую он читал без труда», — писал об этом ученом *А. Эйнштейн* (1879–1955). В работе «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) Ньютон сформулировал «аксиомы движения» — их теперь называют *законами Ньютона*. О первом законе Ньютона вы узнаете из данного параграфа.

### 1 Вспоминаем закон инерции

Вспомним из курса физики 7 класса, при каких условиях тело находится в состоянии покоя или движется равномерно прямолинейно. В конце XVI в. итальянский ученый *Галилео Галилей* (1564–1642) экспериментально установил **закон инерции**:

Тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя только тогда, когда на него не действуют другие тела или их действия скомпенсированы (рис. 30.1, 30.2).

❓ Как вы считаете, будет ли двигаться космический корабль, находящийся вдали от звезд, если выключить его двигатели? Если будет двигаться, то как?

### 2 Изучаем инерциальные системы отсчета

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

Однако состояния движения и покоя зависят от выбора системы отсчета (СО). А в какой ли СО наблюдается явление инерции?

Представьте, что вы сидите в купе поезда, стоящего на перроне. На столике в купе лежит мячик. На мячик действуют два тела: Земля и столик. Действия Земли и столика скомпенсированы, и мячик находится в покое. Но как только поезд начинает набирать

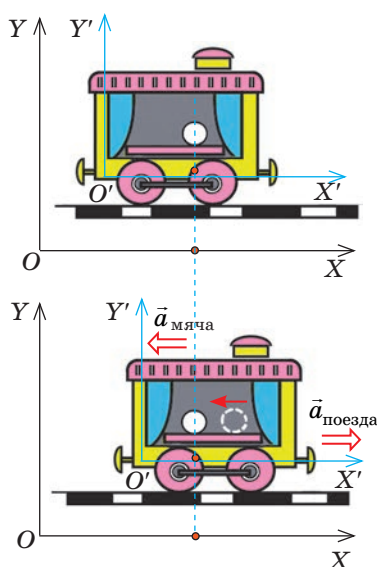


**Рис. 30.1.** Тела находятся в состоянии покоя относительно Земли: притяжение Земли скомпенсировано действием стола (а); действием подвеса (б)

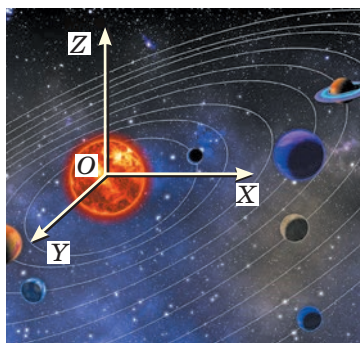


**Рис. 30.2.** Некоторое время парашютист может двигаться равномерно прямолинейно — когда действие Земли уравновешено действием воздуха и строп парашюта





**Рис. 30.3.** Действия столика и Земли на мяч скомпенсированы. Однако в системе отсчета  $XOY$ , связанной с перроном, мяч находится в состоянии покоя, поэтому эта СО — инерциальная; в системе отсчета  $X'O'Y'$ , связанной с начинающим движение поездом, мяч движется с ускорением, поэтому эта СО — неинерциальная



**Рис. 30.4.** Гелиоцентрическая система отсчета: начало координат этой системы расположено в центре Солнца, а оси направлены на далекие звезды

скорость, мячик начинает катиться по столу в направлении, противоположном направлению движения поезда. То есть, оставаясь неподвижным относительно перрона, мячик относительно поезда начинает двигаться с ускорением (рис. 30.3). Следовательно, относительно СО, связанной с поездом, набирающим скорость, явление инерции не наблюдается (действия Земли и столика на мячик скомпенсированы, но мячик не сохраняет свою скорость).

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

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

Далее, если специально не оговорено, будем пользоваться только инерциальными СО.

Обычно в качестве инерциальной используют СО, жестко связанную с точкой на поверхности Земли. Но эту систему можно считать инерциальной только условно, так как Земля вращается вокруг своей оси. Для более точных измерений используют, например, инерциальную СО, связанную с Солнцем, — *гелиоцентрическую систему отсчета* (рис. 30.4).

Если мы знаем хотя бы одну инерциальную СО, то можем найти много других, ведь любая СО, движущаяся относительно инерциальной СО равномерно прямолинейно, тоже является инерциальной.

Так, если вы сохраняете состояние покоя или равномерного прямолинейного движения относительно Земли, то и относительно поезда, движущегося относительно Земли с неизменной скоростью, вы тоже будете двигаться равномерно прямолинейно (хотя и с другой скоростью).

Заметим, что в *классической механике\** при переходе от одной инерциальной СО к другой скорость движения, перемещение и координата тела изменяются, а вот *сила, масса, ускорение, время движения и расстояния между телами остаются неизменными*.

\* Классическая механика рассматривает движение тел, скорость движения которых намного меньше скорости распространения света.

### 3 Формулируем первый закон Ньютона

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 и представил его так: *любое изолированное тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку оно не вынуждено приложенными силами изменить это состояние.*

Обратим внимание на следующее.

1. Двигается тело равномерно, ускоренно или находится в состоянии покоя, зависит от выбора СО.

2. В инерциальной СО тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя не только в случае, когда оно *изолировано* (то есть на него не действуют другие тела), а и в случае, когда силы, действующие на тело, *скомпенсированы*.

Учитывая сказанное, в современной физике **первый закон Ньютона** формулируют так:

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

Итак, *первый закон Ньютона постулирует существование инерциальных систем отсчета.*

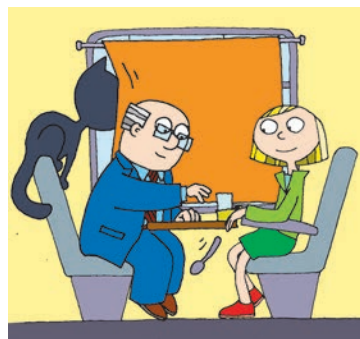
### \* 4 Узнаём о принципе относительности Галилея

Наблюдая движение тел в разных инерциальных СО, Г. Галилей пришел к выводу, который получил название **принцип относительности Галилея**:

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

Галилей писал: «Если мы, находясь в каюте парусника, будем выполнять любые 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...»

Вы тоже можете установить принцип относительности, если, например, проведете ряд опытов в вагоне поезда, движущегося равномерно прямолинейно. Так, чашка, которая стоит на столе, будет находиться в состоянии покоя, а если уронить ложку, то она относительно вагона будет падать вертикально вниз (рис. 30.5).



**Рис. 30.5.** Никакими механическими экспериментами нельзя определить, движется вагон равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя. Пассажир может это узнать только посмотрев в окно



### Подводим итоги

Тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя, когда на него не действуют другие тела и поля или их действия скомпенсированы, — это современная формулировка закона инерции, экспериментально установленного Г. Галилеем. Сейчас закон, установленный Галилеем, называют первым законом Ньютона и формулируют так: существуют такие системы отсчета (их называют инерциальными), относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на тело не действуют никакие силы или эти силы скомпенсированы. Обычно как инерциальные используют СО, связанные с Землей. Любая СО, движущаяся относительно инерциальной СО равномерно прямолинейно, тоже инерциальна.



### Контрольные вопросы

1. При каких условиях тело сохраняет скорость своего движения? Приведите примеры. 2. Сформулируйте закон инерции. 3. Какие СО называются инерциальными? неинерциальными? Приведите примеры таких систем. 4. Сформулируйте первый закон Ньютона. Что он постулирует?



### Упражнение № 30

- Вы сидите на стуле — вы, как и стул, находитесь в состоянии покоя относительно Земли. Какие тела действуют на стул? на вас? Что можно сказать об этих действиях?
- Гребцы пытаются заставить лодку двигаться против течения, но лодка остается неподвижной относительно берега. Действия каких тел скомпенсированы?
- Кот лежит на столе (см. рис. 30.1). Будет ли СО, связанная с котом, инерциальной? Будет ли инерциальной СО, связанная с паучком, который равномерно опускается на паутинке? Будет ли инерциальной СО, связанная с мышью, которая увидела кота и замедляет движение? Ответы поясните.
- На рис. 1 изображено несколько тел. 1) С каким телом вы связали бы СО, чтобы она была инерциальной? неинерциальной? Ответ обоснуйте. 2) Какой в данный момент времени будет скорость движения собаки в СО, связанной с пешеходом; в СО, связанной с грузовиком? 3) Каким будет ускорение движения автомобиля в СО, связанной с деревом; в СО, связанной с пешеходом?

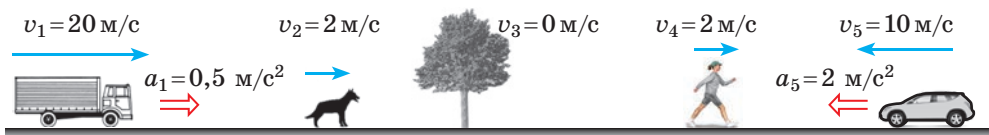


Рис. 1

- Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, почему Г. Галилея считают основателем экспериментально-математического метода.



- На рис. 2 изображены два тела и силы, действующие на них (1 клетка — 1 Н). Для каждого случая найдите направление и модуль равнодействующей сил.



Рис. 2

## § 31. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Вы уже знаете условия, при которых тело движется равномерно прямолинейно. А при каких условиях тело движется равноускоренно? От чего зависит ускорение движения тела? Ответы на эти вопросы дал И. Ньютон, сформулировав *вторую аксиому движения*. О втором законе Ньютона — *основном законе динамики* — пойдет речь в этом параграфе.

### 1 Формулируем второй закон Ньютона

Вам хорошо известно: если на тело подействовать с большей силой, оно быстрее изменит скорость своего движения (приобретет большее ускорение). Опыты показывают: во сколько раз увеличивается сила, во столько же раз увеличивается ускорение, приобретенное телом в результате действия этой силы. *Ускорение движения тела прямо пропорционально силе, приложенной к этому телу:*

$$a \sim F.$$

Если на тела разной массы подействовать с одинаковой силой, то ускорения тел будут разными: чем больше масса тела, тем меньшим будет его ускорение. Так, если к теннисному мячу и к шару для боулинга приложить одинаковую силу, то скорость движения шара изменится меньше (или понадобится больше времени, чтобы скорость движения шара изменить так же, как и мяча). *Ускорение, приобретенное телом в результате действия силы, обратно пропорционально массе этого тела:*

$$a \sim \frac{1}{m}.$$

Связь между силой, действующей на тело, массой тела и ускорением, которое приобретает тело в результате действия этой силы, устанавливает **второй закон Ньютона**:

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

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

### Сила

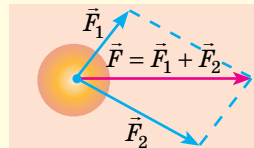
**Сила  $\vec{F}$**  — векторная физическая величина, являющаяся мерой действия одного тела на другое (мерой взаимодействия).

$$[F] = 1 \text{ Н.}$$

Сила определена, если известны ее значение (модуль), направление и указана точка приложения силы.

$\vec{F}$  значение  
направление  
точка приложения

Если на тело действует несколько сил, то их общее действие можно заменить действием одной силы — **равнодействующей  $\vec{F}$** .  
Равнодействующая равна векторной сумме сил, приложенных к телу:



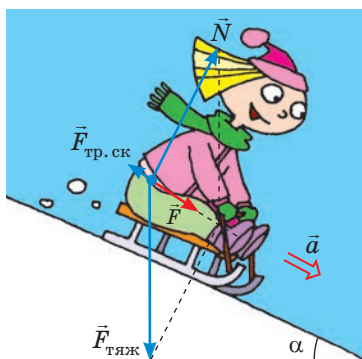
### Масса

**Масса  $m$**  — физическая величина, которая является мерой инертности тела.

Единица массы в СИ — *килограмм*:

$$[m] = 1 \text{ кг.}$$

**Инертность** — свойство тела, заключающееся в том, что для изменения скорости движения тела в результате взаимодействия *требуется время*.



**Рис. 31.1.** Сила  $\vec{F}$  — равнодействующая силы тяжести  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , силы нормальной реакции опоры  $\vec{N}$  и силы трения скольжения  $\vec{F}_{\text{тр.ск}}$ . Сила  $\vec{F}$  — причина ускорения  $\vec{a}$  девочки

Обычно на тело одновременно действуют несколько сил. В таком случае силу  $\vec{F}$  понимают как равнодействующую всех сил, приложенных к телу:  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$  (см. рис. 31.1), а второй закон Ньютона записывают так:

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

Заметим, что второй закон Ньютона, записанный в виде  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , выполняется только в инерциальных системах отсчета.

## 2 Узнаём о следствиях из второго закона Ньютона

1. Именно на основе второго закона Ньютона установлена единица силы в СИ — *ньютон*: 1 Н — это сила, которая, действуя на тело массой  $m = 1$  кг, придает ему ускорение  $a = 1$  м/с<sup>2</sup>:

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

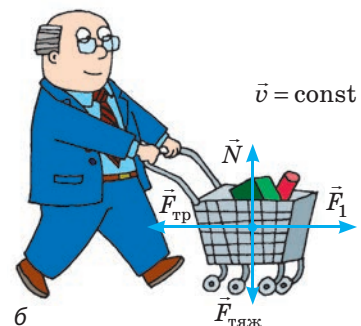
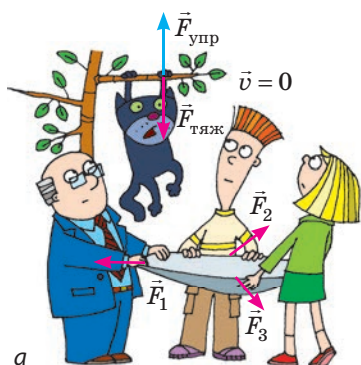
2. Зная модуль и направление равнодействующей  $\vec{F}$  сил, которые действуют на тело, всегда можно определить модуль и направление ускорения  $\vec{a}$ , которое приобретает тело в результате этого действия:

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

**?** Обоснуйте последнее утверждение, используя знания по математике.

3. Второй закон Ньютона позволяет сформулировать **условие равноускоренного движения тела**: *тело движется равноускоренно прямолинейно только тогда, когда равнодействующая сил, приложенных к телу, не изменяется со временем.*

4. Если равнодействующая равна нулю ( $\vec{F} = 0$ ), тело не будет изменять скорость своего движения ( $\vec{a} = 0$ ) (рис. 31.2). Итак, закон инерции можно сформулировать следующим образом: *тело находится в состоянии покоя или движется равномерно прямолинейно, если силы, действующие на тело, скомпенсированы.*



**Рис. 31.2.** Если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю, то тело находится в состоянии покоя (а) или движется с неизменной скоростью (б)





### Подводим итоги

Второй закон Ньютона — основной закон динамики: ускорение  $\vec{a}$ , которое приобретает тело в результате действия силы  $\vec{F}$ , прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе  $m$  тела:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

Если на тело одновременно действуют несколько сил  $(\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n)$ , второй закон Ньютона записывают так:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}$ , или  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}$ .

Тело движется равноускоренно прямолинейно только в том случае, если равнодействующая сил, приложенных к телу, не изменяется со временем.



### Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит ускорение движения тела? 2. Сформулируйте и запишите второй закон Ньютона. 3. Как записать второй закон Ньютона, если на тело действует несколько сил? 4. Что можно сказать о направлении равнодействующей и направлении ускорения, которое равнодействующая придает телу? 5. Каково условие равноускоренного прямолинейного движения тела?



### Упражнение № 31

1. Поезд массой 5 т движется с ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Определите модуль равнодействующей сил, которые действуют на поезд.
2. Автомобиль движется по прямолинейному участку дороги. Как направлена равнодействующая сил, приложенных к автомобилю, если он набирает скорость? замедляет свое движение?
3. Тело массой 2 кг, движущееся на юг, изменяет скорость своего движения в результате действия силы 10 Н, направленной на восток. Определите модуль и направление ускорения движения тела.
4. В результате действия силы 15 кН тело движется прямолинейно, а его координата изменяется по закону  $x = -200 + 9t - 3t^2$ . Определите массу тела.
5. На тело массой 5 кг действуют две взаимно перпендикулярные силы: 12 и 9 Н (рис. 1). Определите ускорение движения тела.
6. Составьте и решите задачу на применение второго закона Ньютона к движению некоторого реального тела.
7. Мальчик и девочка тянут за концы веревки (рис. 2). Кто из них придет в движение? Кто приобретет большую скорость движения? Обоснуйте свой ответ.

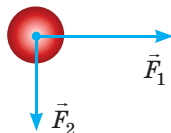


Рис. 1



Рис. 2



### Экспериментальное задание

Воспользовавшись линейкой и двумя брусками разной массы, докажите:

- 1) с увеличением силы увеличивается и ускорение, которое приобретает любой брусок при действии силы;
- 2) если на разные бруски будет действовать одна и та же сила, то брусок большей массы приобретет меньшее ускорение;
- 3) направление ускорения всегда совпадает с направлением действия силы. Опишите свои действия. Как вы оценивали ускорение тел?

## § 32. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Ударьте ладонью о парту. Больно? Но почему? Ведь это вы били парту, а не парту вас. Потяните своего товарища за руку, стоя на гладком льду. Кто сдвинется с места? Оба? А почему? Ведь это вы тянули товарища, а не товарищ вас. Сможете ли вы, ухватившись за волосы, вытянуть себя из воды? Нет? Но почему? Вы же сможете вытянуть таким образом из воды человека, который даже тяжелее вас. На эти и другие вопросы вам поможет ответить третий закон Ньютона.



**Рис. 32.1.** Действие — всегда взаимодействие. Играя с мячом, вы действуете на него, например, ногой. Мяч тоже действует на ногу (это действие особенно ощутимо, если вы играете босиком)



**Рис. 32.2.** Действие — всегда взаимодействие. Земля притягивает к себе Луну (и Луна не «улетает» в космическое пространство). Луна тоже притягивает Землю (и на Земле наблюдаются приливы и отливы)

### 1 Устанавливаем третий закон Ньютона

Вы уже знаете, что тела всегда взаимно действуют друг на друга — *взаимодействуют* (рис. 32.1, 32.2). Обратимся к опыту и выясним, как связаны силы, с которыми тела действуют друг на друга.

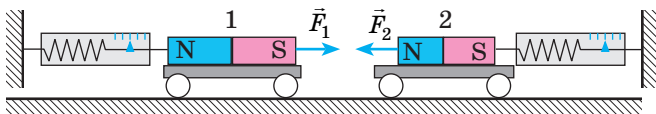
Поставим на горизонтальную поверхность две одинаковые легкоподвижные тележки и с помощью динамометров прикрепим их к вертикальным стойкам. На каждой тележке закрепим магнит, расположив магниты разноименными полюсами друг к другу. Магниты притянутся, сдвинут тележки и растянут пружины динамометров. При этом показания обоих динамометров будут одинаковыми (рис. 32.3).

Можно провести множество опытов по измерению таких сил, и результат всегда будет один: *силы, с которыми взаимодействуют два тела, равны по модулю и противоположны по направлению* (рис. 32.4, 32.5).

Взаимодействие тел описывает закон взаимодействия — **третий закон Ньютона**:

Тела взаимодействуют друг с другом с силами, которые направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:

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



**Рис. 32.3.** С какой силой магнит 2 притягивает магнит 1, с такой же силой магнит 1 притягивает магнит 2:  $F_1 = F_2$ . Силы при этом имеют противоположные направления:  $\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2 \downarrow$

## 2 Узнаём о некоторых особенностях взаимодействия тел

Обратившись к примерам, приведенным на рис. 32.1—32.5, заметим ряд особенностей.

1. Третий закон Ньютона выполняется как при непосредственном контакте тел (см. рис. 32.1, 32.5), так и при взаимодействии тел на расстоянии (см. рис. 32.2—32.4).

2. *Силы всегда возникают парами*: если есть сила  $\vec{F}_1$ , действующая на тело 1 со стороны тела 2, то обязательно есть равная ей по модулю и противоположно направленная сила  $\vec{F}_2$ , действующая на тело 2 со стороны тела 1. А вот проявления этих сил (или одной из них) не всегда заметны. Например, при ходьбе вы отталкиваетесь от поверхности Земли, следовательно, на вас действует сила со стороны Земли. Согласно третьему закону Ньютона, с такой же силой вы толкаете Землю назад. Но из-за большой массы Земли результат действия этой силы незаметен. Если же вы будете идти по легкой лодке на воде, то ваше действие на лодку заставит ее двигаться в направлении, противоположном вашему движению.

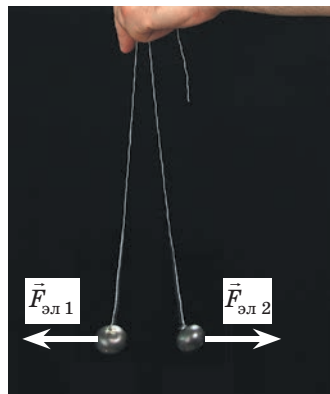
3. Пары сил, возникающих при взаимодействии двух тел, всегда *имеют одну природу*.

**?** Рассмотрите рис. 32.1—32.5 и убедитесь в справедливости последнего утверждения.

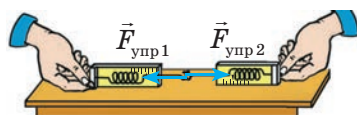
Казалось бы, если при любом взаимодействии возникает пара равных по модулю и противоположных по направлению сил, то такие силы должны уравновесить друг друга. А это означает, что действие отсутствует. Получается, мы обречены или на неподвижность, или на непрерывное движение? Разумеется, нет! *Уравновешиваются только силы, приложенные к одному телу*. Силы же, возникающие при взаимодействии, приложены к *разным* телам, поэтому они *не могут уравновесить (скомпенсировать) друг друга*.

## 3 Учимся решать задачи

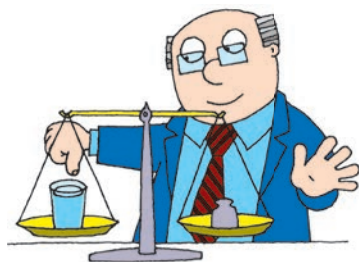
**Задача.** Сосуд с водой уравновешен на весах (рис. 32.6). Нарушится ли равновесие весов, если опустить в воду палец, не касаясь при этом дна и стенок сосуда?



**Рис. 32.4.** На каждый из двух одноименно заряженных шариков действует сила Кулона со стороны другого шарика. Эти силы равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{F}_{эл1} = -\vec{F}_{эл2}$



**Рис. 32.5.** Если динамометры сцепить крючками и потянуть в разные стороны, то показания динамометров будут одинаковыми:  $\vec{F}_{упр1} = -\vec{F}_{упр2}$



**Рис. 32.6.** К задаче в § 32

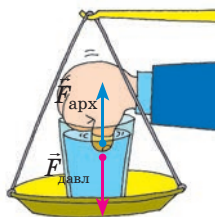


Рис. 32.7. К задаче в § 32

**Решение.** После погружения пальца в воду на него начнет действовать архимедова сила, направленная вертикально вверх. Согласно третьему закону Ньютона со стороны пальца на воду тоже начнет действовать сила — равная по модулю архимедовой силе и направленная вниз:  $\vec{F}_{\text{давл}} = -\vec{F}_{\text{арх}}$  (рис. 32.7). Таким образом, палец, даже не касаясь дна и стенок сосуда, толкнет воду, а вместе с ней и сосуд вниз — равновесие весов нарушится.

**Ответ:** равновесие нарушится.



### Подводим итоги

Тела всегда взаимно действуют друг на друга — взаимодействуют. Взаимодействие тел описывает третий закон Ньютона (закон взаимодействия): силы, с которыми тела действуют друг на друга, направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Пары сил, возникающие при взаимодействии, всегда имеют одну природу; эти силы не уравнивают друг друга, потому что приложены к разным телам.



### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте третий закон Ньютона. Приведите примеры его проявления. Почему его называют законом взаимодействия? 2. Что можно сказать о природе сил, возникающих при взаимодействии тел? Приведите примеры. 3. Почему силы, возникающие при взаимодействии тел, не уравнивают друг друга?



### Упражнение № 32

1. Девочка ударила по мячу с силой 10 Н (рис. 1). С какой силой мяч «ударил» девочку? В каком направлении действует эта сила?
2. Рассмотрите гравитационное взаимодействие яблока на ветке и Земли (рис. 1). Что притягивается сильнее: яблоко к Земле или Земля к яблоку?
3. Мальчик массой 48 кг, стоя на гладком льду, оттолкнул от себя шар массой 3 кг, придав ему в горизонтальном направлении ускорение 8 м/с<sup>2</sup>. Какое ускорение приобрел мальчик?
4. Веревка выдерживает натяжение не более 300 Н. Порвется ли веревка, если четверо тянут ее в противоположные стороны так, как показано на рис. 2, силами по 100 Н каждый? Порвется ли веревка, если один ее конец закрепить, а все четверо будут тянуть ее за второй конец в одном направлении?
5. Подумайте и запишите 5–10 примеров взаимодействия тел. Выполните схематические рисунки. Укажите пары сил (как «скрытых», так и явных).



Рис. 1

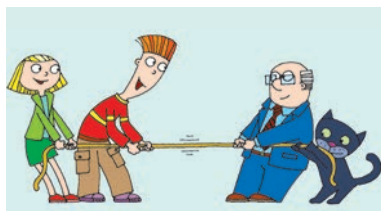


Рис. 2

## § 33. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. СИЛА ТЯЖЕСТИ. УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Говорят, что И. Ньютон сам рассказывал, как он открыл закон всемирного тяготения. Как-то ученый гулял по саду и увидел на дневном небе Луну. В этот момент на его глазах с ветки упало яблоко. Именно тогда Ньютон подумал о том, что, возможно, это одна и та же сила заставляет яблоко падать на землю, а Луну — оставаться на околоземной орбите.

### 1 Изучаем гравитационное взаимодействие

Все без исключения физические тела во Вселенной притягиваются друг к другу — это явление называют **всемирным тяготением** или **гравитацией** (от лат. *gravitas* — вес).

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

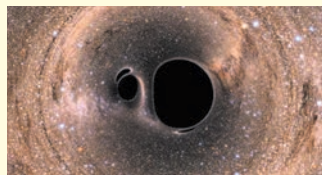
Например, сейчас вы и учебник взаимодействуете силами гравитационного притяжения. Но в данном случае силы настолько малы, что их не зафиксируют даже самые точные приборы. Силы гравитационного притяжения становятся заметными только тогда, когда хотя бы одно из тел имеет массу, сравнимую с массой небесных тел (звезд, планет, их спутников и т. п.).

Гравитационное взаимодействие осуществляется благодаря особому виду материи — **гравитационному полю**, которое существует вокруг *любого тела* — звезды, планеты, человека, книги, молекулы, атома и т. д.

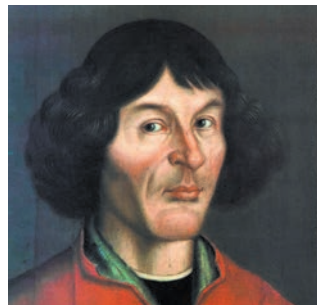
### 2 Открываем закон всемирного тяготения

Первые высказывания о тяготении встречаются у античных авторов. Так, древнегреческий мыслитель *Плутарх* (ок. 46 — ок. 127 гг.) писал: «Луна упала бы на Землю как камень, чуть только исчезла бы сила ее полета».

В XVI–XVII вв. ученые Европы снова обратились к теории существования взаимного притяжения тел. Толчком послужили прежде всего открытия в астрономии: *Николай Коперник* (рис. 33.1) доказал, что в центре Солнечной



11 февраля 2016 г. было объявлено об экспериментальном открытии гравитационных волн, существование которых предугадал в прошлом веке *Альберт Эйнштейн*. *Гравитационная волна* — это распространение переменного гравитационного поля в пространстве. Данная волна излучается подвижной массой и может оторваться от своего источника (как отрывается электромагнитная волна от заряженной частицы, движущейся с ускорением). Считают, что изучение гравитационных волн поможет пролить свет на историю Вселенной и не только...

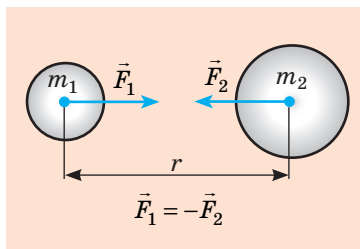


**Рис. 33.1.** Николай Коперник (1473–1543) — польский астроном, создатель гелиоцентрической системы мира



системы находится Солнце, а все планеты вращаются вокруг него; *Иоганн Кеплер* (1571–1630) открыл законы движения планет вокруг Солнца; *Галилео Галилей* создал телескоп и с его помощью увидел спутники Юпитера.

Но почему планеты вращаются вокруг Солнца, а спутники вокруг планет, какая сила удерживает космические тела на орбитах? Одним из первых это понял английский ученый *Роберт Гук* (1635–1703). Он писал: «Все небесные тела имеют притяжение к своему центру, вследствие чего они не только притягивают собственные части и не дают им разлетаться, но и притягивают также все другие небесные тела, находящиеся в сфере их действия». Именно Р. Гук предположил, что сила притяжения двух тел прямо пропорциональна массам этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Однако доказал это *И. Ньютон*, который и сформулировал **закон всемирного тяготения**:



**Рис. 33.2.** Согласно третьему закону Ньютона силы гравитационного притяжения тел равны по модулю и противоположны по направлению

Между любыми двумя телами действуют силы гравитационного притяжения (рис. 33.2), которые прямо пропорциональны произведению масс этих тел и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:

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

где  $G$  — гравитационная постоянная.



Математическую запись какого закона вам напоминает запись закона всемирного тяготения? Запишите формулу.

Гравитационную постоянную впервые измерил английский ученый *Генри Кавендиш* (рис. 33.3) в 1798 г. с помощью крутильных весов:

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

**Гравитационная постоянная численно равна силе, с которой две материальные точки массой 1 кг каждая взаимодействуют на расстоянии 1 м друг от друга (если  $m_1 = m_2 = 1$  кг, а  $r = 1$  м, то  $F = 6,67 \cdot 10^{-11}$  Н).**

Закон всемирного тяготения позволяет описать большое количество явлений, в том числе движение естественных и искусственных тел в Солнечной системе, движение двойных звезд, звездных скоплений и др. В астрономии, опираясь на этот закон, вычисляют массы небесных тел, выясняют характер их движения, строение, эволюцию.



**Рис. 33.3.** Генри Кавендиш (1731–1810) — английский физик и химик. Определил гравитационную постоянную, массу и среднюю плотность Земли; за несколько лет до Ш. Кулона открыл закон взаимодействия электрических зарядов

### 3 Выясняем границы применимости закона всемирного тяготения

Формула  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  дает точный результат в следующих случаях:

1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними (тела можно считать материальными точками);

2) если оба тела имеют шарообразную форму и сферическое распределение вещества;

3) если одно из тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем размеры и масса другого тела, находящегося на поверхности этого шара или на расстоянии от него.

**Обратите внимание!** Закон всемирного тяготения, как и большинство законов классической механики, применяют только в случаях, когда относительная скорость движения тел намного меньше скорости распространения света. В общем случае тяготение описывается *общей теорией относительности*, созданной А. Эйнштейном.

**?** Почему можно воспользоваться законом всемирного тяготения, вычисляя силу притяжения Земли к Солнцу? Луны к Земле? человека к Земле (см. рис. 33.4)?

### 4 Определяем силу тяжести

**Сила тяжести**  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  — сила, с которой Земля (или другое астрономическое тело) притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности или вблизи нее (рис. 33.5)\*.

Согласно закону всемирного тяготения модуль силы тяжести  $F_{\text{тяж}}$ , действующей на тело вблизи Земли, можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{r^2}, \text{ или } F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

где  $G$  — гравитационная постоянная;  $m$  — масса тела;  $M_3$  — масса Земли;  $r = R_3 + h$  — расстояние от центра Земли до тела (рис. 33.6).

\* Сила тяжести обусловлена не только гравитационным притяжением Земли, а и ее суточным вращением, но это важно только для точных расчетов.



Рис. 33.4. К заданию в § 33

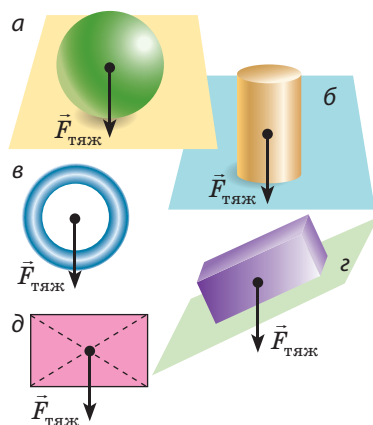


Рис. 33.5. Сила тяжести направлена вертикально вниз и приложена к точке, которую называют *центром тяжести тела*. Центр тяжести однородного симметричного тела расположен в центре симметрии; может быть и вне тела (в)

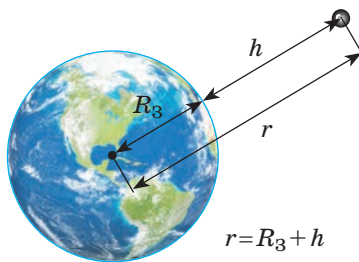


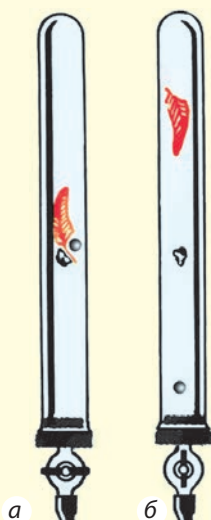
Рис. 33.6. Расстояние  $r$  от центра Земли до тела равно сумме радиуса Земли  $R_3$  и высоты  $h$ , на которой находится тело

## 5

## Что такое ускорение свободного падения

Падение тел впервые исследовал *Галилео Галилей*, который экспериментально доказал: причина того, что легкие тела падают с меньшим ускорением, — сопротивление воздуха; при отсутствии воздуха все тела — независимо от их массы, объема, формы — падают на Землю с одинаковым ускорением.

Более точные эксперименты провел *Исаак Ньютон*, изготовив для этого специальное устройство — *трубку Ньютона*. Эксперименты показали: в вакууме свинцовая дробинка, пробка и птичье перо падали одинаково (*а*), в воздухе перо безнадежно отставало (*б*).



Движение тела только под действием силы тяжести называют **свободным падением**.

При свободном падении сила тяжести, действующая на тело, никакой силой не скомпенсирована, поэтому согласно второму закону Ньютона тело движется с ускорением. Это ускорение называют *ускорением свободного падения* и обозначают символом  $\vec{g}$ :

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{тяж}}}{m}$$

Как и сила тяжести, ускорение свободного падения всегда направлено вертикально вниз ( $\vec{g} \uparrow \vec{F}_{\text{тяж}}$ ) независимо от того, в каком направлении движется тело. Из формулы  $g = F_{\text{тяж}}/m$ :

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

Итак, имеем две формулы для определения модуля силы тяжести:

$$F_{\text{тяж}} = mg; \quad F_{\text{тяж}} = G \frac{m \cdot M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Отсюда получим формулу для вычисления ускорения свободного падения:

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

Анализ последней формулы показывает:

1. Ускорение свободного падения не зависит от массы тела (доказал Г. Галилей).

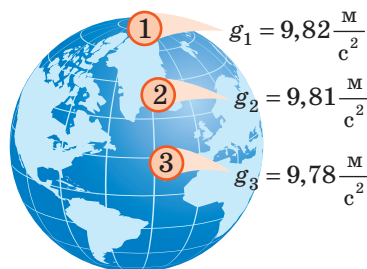
2. Ускорение свободного падения уменьшается при увеличении высоты  $h$ , на которой находится тело над поверхностью Земли, причем заметное изменение происходит, если  $h$  составляет десятки и сотни километров (на высоте  $h = 100$  км ускорение свободного падения уменьшится всего лишь на  $0,3 \text{ м/с}^2$ ).

3. Если тело находится на поверхности Земли ( $h = 0$ ) или на высоте нескольких километров ( $h \ll R_3$ ):

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2} \approx 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

**Обратите внимание:** решая задачи, будем считать, что  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Отметим, что из-за вращения Земли, а также из-за того, что форма Земли — геоид (экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 км), *ускорение свободного падения зависит от географической широты местности* (рис. 33.7).



**Рис. 33.7.** Модуль ускорения свободного падения на экваторе немного меньше, чем на полюсе ( $g_3 < g_1$ )

**?** Из курса физики 7 класса вы знаете, что  $g \approx 10 \text{ Н/кг}$ . Докажите, что  $1 \text{ Н/кг} = 1 \text{ м/с}^2$ .



### Подводим итоги

Взаимодействие, присущее всем телам во Вселенной и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу, называют гравитационным. Гравитационное взаимодействие осуществляется с помощью особого вида материи — гравитационного поля.

Закон всемирного тяготения: между любыми двумя телами действует сила гравитационного притяжения, которая прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:  $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ , где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$  — гравитационная постоянная.

Силу, с которой Земля притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности или вблизи нее, называют силой тяжести. Сила тяжести направлена вертикально вниз, приложена к центру тяжести тела, а ее модуль вычисляют по формулам:  $F_{\text{тяж}} = mg$ ;  $F_{\text{тяж}} = G \frac{m \cdot M_3}{(R + h)^2}$ .

Движение тел только под действием силы тяжести называют свободным падением, а ускорение, с которым при этом движутся тела, — ускорением свободного падения  $\vec{g}$ . Это ускорение всегда направлено вертикально вниз и не зависит от массы тела. На поверхности Земли  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .



### Контрольные вопросы

1. Какое взаимодействие называют гравитационным? Приведите примеры.
2. Сформулируйте и запишите закон всемирного тяготения.
3. Каков физический смысл гравитационной постоянной? Чему она равна?
4. Каковы границы применимости закона всемирного тяготения?
5. Дайте определение силы тяжести. По каким формулам ее вычисляют и как она направлена?
6. От каких факторов зависит ускорение свободного падения?



### Упражнение № 33

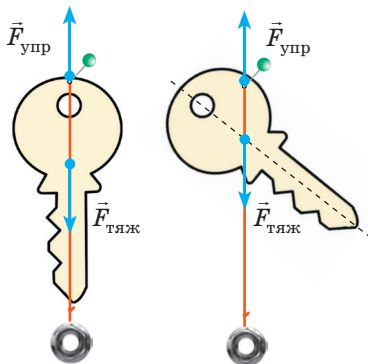
1. Определите массу тела, если на поверхности Луны на него действует сила тяжести 7,52 Н. Какая сила тяжести будет действовать на это тело на поверхности Земли? Ускорение свободного падения на Луне —  $1,6 \text{ м/с}^2$ .

2. Можно ли, воспользовавшись законом всемирного тяготения, рассчитать силу притяжения двух океанских лайнеров (см. рисунок)?
3. Как изменится сила гравитационного притяжения между двумя шариками, если один из них заменить другим, вдвое большей массы?
4. Измерив гравитационную постоянную, Г. Кавендиш смог определить массу Земли, после чего гордо заявил: «Я взвесил Землю». Определите массу Земли, зная ее радиус ( $R_3 \approx 6400$  км), ускорение свободного падения на ее поверхности и гравитационную постоянную.
5. Определите ускорение свободного падения на высоте, которая равна трем радиусам Земли.
6. Определите гравитационное ускорение на поверхности планеты, масса и радиус которой в два раза больше, чем масса и радиус Земли.
7. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте об ускорении свободного падения на поверхности планет Солнечной системы. На какой планете вы будете меньше весить? Будет ли при этом меньше ваша масса?
8. Уравнение движения тела:  $x = -5t + 5t^2$ . Каковы начальная скорость и ускорение движения тела? Через какой интервал времени тело изменит направление своего движения?



### Экспериментальное задание

Центр тяжести тела неправильной геометрической формы можно определить, подвесив его поочередно за любые две крайние точки (см. рисунок). Вырежьте из плотной бумаги или картона фигурку произвольной формы и определите ее центр тяжести. Поместите фигурку центром тяжести на острие иглы или стержня авторучки. Убедитесь, что фигурка находится в равновесии. Запишите план проведения эксперимента.



### Физика и техника в Украине

**Одесский национальный политехнический университет**, основанный в 1918 г., сегодня — одно из ведущих технических учебных заведений Украины.

С Одесской политехникой связаны имена таких ученых, как лауреат Нобелевской премии И. Е. Тамм, академики Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси, А. Г. Амелин, М. А. Аганин, профессора К. С. Завриев, Ч. Д. Кларк, И. Ю. Тимченко и др.

В Одесском политехническом университете учились и работали выдающиеся инженеры, конструкторы, ученые, изобретатели: В. И. Атрощенко, Г. К. Боресков, А. А. Эннан, А. Э. Нудельман, А. Ф. Дащенко, Л. И. Гутенмахер, Г. К. Сулов, В. В. Ажогин, Л. И. Панов, Б. С. Пристер, А. В. Усов, А. В. Якимов и др.

Основные направления научных исследований и подготовки кадров Одесской политехники — машиностроение, энергетика, химические технологии, компьютерно-интегрированные системы управления, радиоэлектроника, электромеханика, информационные технологии, телекоммуникации.

С 2010 г. ректор университета — *Геннадий Александрович Оборский*, доктор технических наук, профессор, известный специалист в области динамики и надежности технологических систем.



## § 34. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Траектория движения мяча, брошенного вертикально вверх или вниз, — прямая. После горизонтального броска баскетболиста мяч движется по криволинейной траектории. Также по криволинейной траектории движется и мяч, брошенный под углом к горизонту гимнасткой во время выступления. Все описанные движения происходят *только* под действием силы тяжести, то есть являются свободным падением. Почему же отличаются траектории? Причина — в разных начальных условиях (рис. 34.1).

### 1 Принимаем ряд упрощений

Характер движения тела в поле тяжести Земли довольно сложен, и его описание выходит за рамки школьной программы. Поэтому примем ряд упрощений:

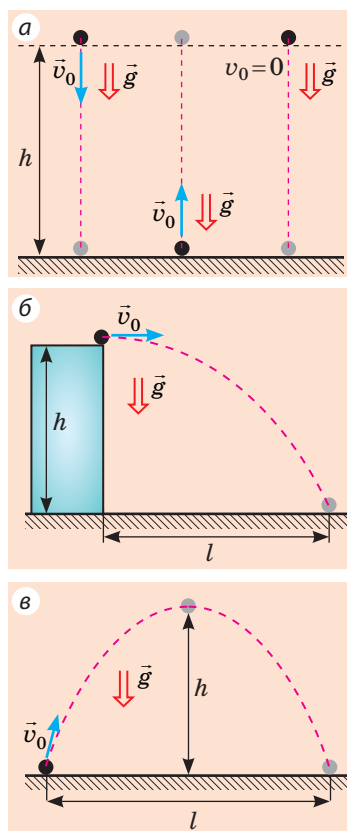
- систему отсчета, связанную с точкой на поверхности Земли, будем считать инерциальной;
- будем рассматривать перемещение тел вблизи поверхности Земли, то есть на небольшой (по сравнению с радиусом Земли) высоте. Тогда кривизной поверхности Земли можно пренебречь, а ускорение свободного падения можно считать неизменным:  $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ;
- не будем учитывать сопротивление воздуха.

*Обратите внимание:* если принять только первые два упрощения, полученный результат будет очень близок к реальному; последнее же упрощение не дает серьезной погрешности только в случаях, когда *тела тяжелые, небольшие по размерам, а скорость их движения достаточно мала*. Именно такие тела будем рассматривать далее.

### 2 Изучаем движение тела, брошенного вертикально

Наблюдая за движением небольших тяжелых тел, которые брошены вертикально вниз или вертикально вверх или падают без начальной скорости, заметим, что траектория движения таких тел — отрезки прямой (см. рис. 34.1, а). К тому же мы знаем, что эти тела движутся с неизменным ускорением.

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



**Рис. 34.1.** Траектория движения тела под действием силы тяжести зависит от направления начальной скорости: тело, брошенное вертикально, движется по прямолинейной траектории (а); траектория движения тела, брошенного горизонтально (б) или под углом к горизонту (в), — параболическая

Чтобы математически описать движение тела, брошенного вертикально вверх или вниз (свободное падение тела), воспользуемся формулами зависимости скорости, перемещения и координаты от времени для равноускоренного прямолинейного движения.

Подойдем к записи формул, описывающих свободное падение, «технически».

1. Когда описывают движение тела по вертикали, то векторы скорости, ускорения и перемещения традиционно проектируют на ось  $OY$ , поэтому в уравнениях движения *заменяем  $x$  на  $y$* .

2. Перемещение тела по вертикали обычно обозначают символом  $h$  (высота), поэтому *заменяем  $s$  на  $h$* .

3. Для всех тел, движущихся только под действием силы тяжести, ускорение равно ускорению свободного падения, поэтому *заменяем  $a$  на  $g$* .

Учитывая эти замены, получим уравнения, которыми описывают движение свободно падающего тела:

Название формулы	Равноускоренное движение вдоль оси $OX$	Свободное падение вдоль оси $OY$
Уравнение зависимости проекции скорости от времени	$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Уравнение зависимости проекции перемещения от времени	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$s_y = h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
Формула, выражающая геометрический смысл перемещения	$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot t$	$s_y = h_y = \frac{v_y + v_{0y}}{2} \cdot t$
Формула для расчета проекции перемещения, если неизвестно время движения тела	$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	$s_y = h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$
Уравнение координаты	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x}{2} t^2$	$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y}{2} t^2$

**Задача 1.** Воздушный шар равномерно поднимается со скоростью 2 м/с. На высоте 7 м от поверхности земли с него упало небольшое тяжелое тело. Через какой интервал времени тело упадет на землю? Какой будет скорость движения тела в момент падения? Падение тела считайте свободным.

*Анализ физической проблемы.* Выполним пояснительный рисунок (рис. 1). Ось  $OY$  направим вертикально вниз. Начало координат совместим с положением тела в момент начала падения.

Тело упало с равномерно поднимавшегося шара, поэтому в момент начала падения скорость движения тела была равна скорости движения шара и направлена вертикально вверх.

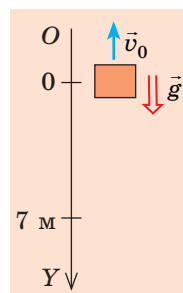


Рис. 1

**Дано:**

$v_0 = 2 \text{ м/с}$

$h = 7 \text{ м}$

$g = 10 \text{ м/с}^2$

**Найти:**

$t — ?$

$v — ?$

**Поиск математической модели, решение**

Для вычисления времени падения воспользуемся уравне-

нием перемещения:  $h_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$ .

Конкретизируем уравнение (перейдем от проекций к модулям). Из рис. 1 видим:  $h_y = h = 7 \text{ м}$ ;  $v_{0y} = -v_0 = -2 \text{ м/с}$ ;  $g_y = g = 10 \text{ м/с}^2$ . Подставим эти данные в уравнение перемещения:  $7 = -2t + 5t^2 \Rightarrow 5t^2 - 2t - 7 = 0$ .

Решив полученное уравнение, найдем  $t$ :  $D = 4 + 4 \cdot 5 \cdot 7 = 144$ ;  $t_1 = \frac{2+12}{10} = 1,4 \text{ (с)}$ ;  
 $t_2 = \frac{2-12}{10} = -1 \text{ (с)}$  — значение корня противоречит физическому смыслу.

Скорость движения в момент падения определим по формуле  $v_y = v_{0y} + g_y t$ .Учитывая, что  $v_{0y} = -v_0 = -2 \text{ м/с}$ ;  $g_y = g = 10 \text{ м/с}^2$ , имеем:  $v_y = -2 + 10t$ .Поскольку время падения  $t = 1,4 \text{ с}$ , то  $v_y = -2 + 10 \cdot 1,4 = 12 \text{ (м/с)}$ .**Ответ:**  $t = 1,4 \text{ с}$ ;  $v = 12 \text{ м/с}$ .

**Задача 2.** Из точек  $A$  и  $B$ , расположенных на одной вертикали на расстоянии  $105 \text{ м}$  друг от друга (см. рис. 2), бросили с одинаковой скоростью  $10 \text{ м/с}$  два тела. Тело 1 бросили из точки  $A$  вертикально вниз, а через  $1 \text{ с}$  из точки  $B$  бросили вертикально вверх тело 2. На каком расстоянии от точки  $A$  тела встретятся?

**Анализ физической проблемы.** Оба тела движутся прямолинейно с ускорением  $\vec{a} = \vec{g}$ . В момент встречи координаты тел будут одинаковы:  $y_1 = y_2$ . Следовательно, для решения задачи нужно записать уравнение координаты для каждого тела.

Договоримся, что начало координат совпадает с положением тела 2 ( $y_{02} = 0$ ), тогда начальная координата тела 1 —  $105 \text{ м}$  ( $y_{01} = 105 \text{ м}$ ). Время движения тела 2 на  $1 \text{ с}$  меньше времени движения тела 1, то есть  $t_2 = t_1 - 1 \text{ с}$ .

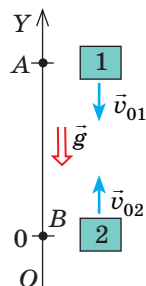


Рис. 2

**Поиск математической модели, решение.** Запишем уравнение координаты в общем виде и конкретизируем его для каждого тела:

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

**Тело 1**

$y_{01} = 105 \text{ м}$ ;  $v_{01y} = -v_{01} = -10 \text{ м/с}$ ;  
 $g_y = -g = -10 \text{ м/с}^2$  (начальная скорость и ускорение направлены противоположно направлению

оси  $OY$ ). Значит:

$$y_1 = 105 - 10t_1 - 5t_1^2.$$

**Тело 2**

$y_{02} = 0$ ;  $v_{02y} = v_{02} = 10 \text{ м/с}$ ;  
 $g_y = -g = -10 \text{ м/с}^2$  (начальная скорость совпадает по направлению с осью  $OY$ , ускорение направлено противоположно оси  $OY$ ). Значит:

$$y_2 = 0 + 10t_2 - 5t_2^2.$$

Учитывая, что  $y_1 = y_2$ , а  $t_2 = t_1 - 1$ , имеем:

$$105 - 10t_1 - 5t_1^2 = 10(t_1 - 1) - 5(t_1 - 1)^2.$$

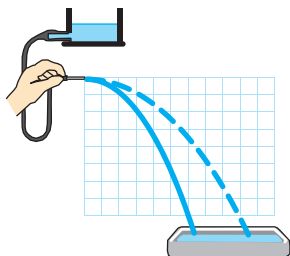
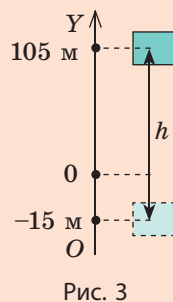
**?** Докажите, что после раскрытия скобок и приведения подобных слагаемых получим уравнение  $30t_1 = 120$ .

Итак,  $t_1 = 4$  с — время встречи. Через 4 с тело 1 окажется в точке с координатой

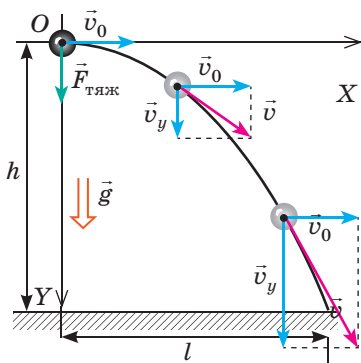
$$y_1 = 105 - 10 \cdot 4 - 5 \cdot 4^2 = -15 \text{ (м)}.$$

Таким образом, тела встретятся на расстоянии  $h = 105 + 15 = 120$  (м) от точки А (см. рис. 3).

Ответ:  $h = 120$  м.



**Рис. 34.2.** Струя воды, вытекающая из горизонтально расположенной трубки, падает на землю по параболической траектории, кривизна которой зависит от начальной скорости движения частиц воды



**Рис. 34.3.** Движение тела, брошенного горизонтально, складывается из двух движений: равномерного — вдоль оси  $OX$  со скоростью  $\vec{v}_0$ ; равноускоренного — вдоль оси  $OY$  без начальной скорости и с ускорением  $\vec{g}$

### 3 Рассматриваем движение тела, брошенного горизонтально

Рассматривая падение горизонтально направленной струи воды, обнаружим, что траектория движения частиц воды — часть параболы (рис. 34.2). Частью параболы будут и траектория движения теннисного мяча, если ему придать горизонтальную скорость, и траектория брошенного горизонтально камешка и т. д.

Рассмотрим движение тела, брошенного горизонтально, как результат сложения *двух движений* (рис. 34.3): 1) *равномерного* — вдоль оси  $OX$ , поскольку на тело вдоль этой оси не действует никакая сила (проекция силы тяжести на ось  $OX$  равна нулю); 2) *равноускоренного* (с ускорением  $\vec{g}$ ) — вдоль оси  $OY$ , поскольку вдоль оси  $OY$  на тело действует сила тяжести.

Вдоль оси  $OX$  тело движется равномерно, поэтому скорость  $v_x$  движения тела неизменна и равна начальной скорости  $v_0$ , а дальность  $l$  полета тела за время  $t$  равна произведению начальной скорости  $v_0$  и времени  $t$  движения тела:

$$v_x = v_0; \quad l = v_0 t.$$

Вдоль оси  $OY$  тело свободно падает, поэтому скорость его движения и высоту падения определим по формулам:  $v_y = v_{0y} + g_y t$ ;

$h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$ . Из рис. 34.3 видим:  $v_{0y} = 0$ ;  $g_y = g$ ;  $h_y = h$ , поэтому

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

**?** Докажите математически, что траектория движения тела, брошенного горизонтально, — параболическая, получив зависимость  $y(x)$  для такого движения.

Модуль скорости движения тела в произвольной точке траектории вычислим, воспользовавшись теоремой Пифагора:  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  (рис. 34.4).

Так как  $v_x = v_0$ , а  $v_y = gt$ , имеем:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}$$

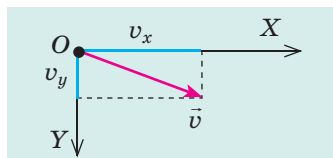


Рис. 34.4. К определению модуля скорости движения тела

**Задача 3.** С отвесной скалы высотой 20 м в море горизонтально бросили камень. С какой скоростью бросили камень, если он упал в воду на расстоянии 16 м от скалы? Какова скорость движения камня в момент падения в море? Сопротивлением воздуха пренебречь.

*Анализ физической проблемы.* Начальная скорость движения камня направлена горизонтально. Камень свободно падает. Значит, движение тела вдоль оси  $OX$  — равномерное, а вдоль оси  $OY$  — равноускоренное, без начальной скорости, с ускорением  $\vec{g}$ .

Дано:

$h = 20$  м  
 $l = 16$  м  
 $g = 10$  м/с<sup>2</sup>

Найти:

$v_0$  — ?  
 $v$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Из формулы  $h = \frac{gt^2}{2}$  найдем время падения:  $t^2 = \frac{2h}{g} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ .

Зная время и дальность полета камня, вычислим начальную скорость его движения и скорость в момент падения:

$$l = v_0 t \Rightarrow v_0 = \frac{l}{t}; \quad v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$

Проверим единицы, найдем значения искомых величин:

$$[t] = \sqrt{\frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}} = \text{с}, \quad t = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{10}} = 2 \text{ (с)}; \quad v_0 = \frac{16 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 8 \text{ м/с};$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad v = \sqrt{8^2 + 10^2 \cdot 2^2} = \sqrt{64 + 400} \approx 22 \text{ (м/с)}.$$

Ответ:  $v_0 = 8$  м/с;  $v \approx 22$  м/с.



### Контрольные вопросы

1. Какие упрощения мы принимаем, решая задачи на движение тел под действием силы тяжести? 2. Запишите уравнение движения тела под действием силы тяжести в общем виде. 3. Какова траектория движения тела, брошенного вертикально? горизонтально? 4. Как для тела, брошенного горизонтально, определить дальность полета? высоту падения? скорость движения?



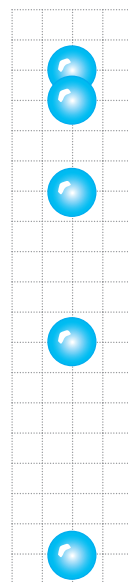
### Упражнение № 34

Выполняя задания, считайте, что сопротивление воздуха отсутствует.

- Первое тело бросили вертикально вверх, второе — вертикально вниз, третье отпустили. Какое тело движется с наибольшим ускорением?
- Тело движется только под действием силы тяжести. Система координат выбрана так, что ось  $OX$  направлена горизонтально, ось  $OY$  — вертикально вверх. Опишите, выполнив пояснительный рисунок, характер движения тела, если: а)  $v_{0x} > 0$ ,  $v_{0y} = 0$ ; б)  $v_{0x} = 0$ ,  $v_{0y} > 0$ ; в)  $v_{0x} = 0$ ,  $v_{0y} < 0$ .



3. Мяч бросили с поверхности земли вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. Определите: а) скорость движения и перемещение мяча через 3 с после начала движения; б) время подъема и максимальную высоту подъема мяча.
4. С крыши дома на высоте 45 м выпущена горизонтально стрела с начальной скоростью 20 м/с. Через какой интервал времени стрела упадет на землю? Какими будут дальность полета и перемещение стрелы?
5. Два шарика расположены на одной вертикали на расстоянии 10 м друг от друга. Одновременно верхний шарик бросают вертикально вниз с начальной скоростью 25 м/с, а нижний просто отпускают. Через какое время шарики столкнутся?
6. На рисунке указаны положения шарика через каждую 0,1 с движения. Определите ускорение свободного падения, если сторона каждого квадрата сетки — 5 см.
7. От сосульки на крыше оторвалась капля. Какой путь преодолеет капля за четвертую секунду после момента отрыва?
8. Самостоятельно рассмотрите движение тела, брошенного под углом к горизонту, и получите уравнения, которыми описывается это движение.



9. Установите соответствие между силой и формулой для ее определения.

1 Сила тяжести      2 Сила Архимеда      3 Сила трения      4 Сила упругости  
 А  $F = mg$       Б  $F = kx$       В  $F = \mu N$       Г  $F = pS$       Д  $F = \rho g V$



### Экспериментальное задание

Положите на край стола небольшое тяжелое тело и толкните его. Пользуясь только линейкой, попробуйте определить скорость, которую вы придали телу.

### Физика и техника в Украине



**Абрам Федорович Иоффе** (1880–1960) — выдающийся украинский советский физик, академик, научный организатор, который вошел в историю как «отец советской физики», «папа Иоффе».

Основные научные достижения А. Ф. Иоффе связаны с изучением электрических, фотоэлектрических и механических свойств кристаллов. Он первым выдвинул гипотезу о том, что полупроводники могут обеспечить эффективное преобразование энергии излучения в электрическую энергию (по этому принципу сегодня развивается солнечная энергетика). А. Ф. Иоффе параллельно с Р. Милликеном впервые определил заряд электрона.

Инициировал создание физико-технических институтов, в частности в Харькове и Днепре, создал всемирно известную научную школу.

Под руководством А. Ф. Иоффе работали будущие Нобелевские лауреаты П. Л. Капица, Н. Н. Семенов, Л. Д. Ландау, И. Е. Тамм, а также выдающиеся ученые, которые внесли значительный вклад в мировую науку: А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович, М. П. Бронштейн, Я. Б. Зельдович, И. К. Кикоин, Б. Г. Константинов, И. В. Курчатов, Ю. Б. Харитон и многие другие.

В 1960 г. имя А. Ф. Иоффе присвоено Физико-техническому институту в Ленинграде (сейчас Санкт-Петербург), в честь ученого названы кратер на Луне, малая планета Солнечной системы 5222, улица в Берлине (Германия).



# § 35. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

Изучая данный параграф, вы ознакомитесь с основными этапами решения задач по динамике, рассмотрите примеры решения некоторых ключевых задач. Материал параграфа следует тщательно проработать, ведь с подобными задачами вы будете встречаться при изучении всего дальнейшего курса физики.

## 1 Вспоминаем силы

Учитывая тему параграфа, прежде всего следует вспомнить определения некоторых сил, с которыми вы ознакомились в 7 классе, изучая механику, формулы для их вычисления, а также направления их действия.

Сила тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$	Сила трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр}}$ ( $\vec{F}_{\text{тр.ск}}$ )	Сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$	Сила Архимеда $\vec{F}_{\text{арх}}$
сила, с которой Земля притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности или вблизи нее	сила, возникающая вследствие скольжения одного тела по поверхности другого	сила, возникающая при деформации тела	выталкивающая сила, которая действует на тело, погруженное в жидкость или газ
$F_{\text{тяж}} = mg$	$F_{\text{тр}} = \mu N$	$F_{\text{упр}} = kx$	$F_{\text{арх}} = \rho_{\text{ж(г)}} g V_{\text{погр}}$
направлена вертикально вниз и приложена к центру тяжести тела	направлена в сторону, противоположную движению тела, и действует вдоль поверхности соприкосновения тел	направлена в сторону, противоположную удлинению, и действует вдоль шнура или пружины	направлена вертикально вверх и приложена к центру погруженной части тела

## 2 Учимся решать задачи

### Алгоритм решения задач по динамике

- Внимательно прочитайте условие задачи. Определите, какие силы действуют на тело, каков характер движения тела (движется оно с ускорением или равномерно прямолинейно).
- Запишите краткое условие задачи. При необходимости переведите значения физических величин в единицы СИ.
- Выполните пояснительный рисунок, на котором укажите силы, действующие на тело, и направление ускорения движения тела.

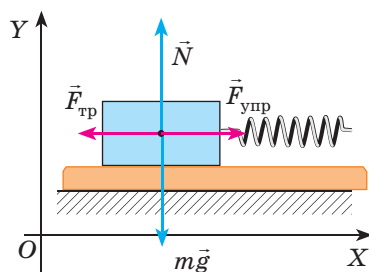
4. Выберите инерциальную систему отсчета. Оси координат желательно направить так, чтобы как можно больше сил было направлено вдоль этих осей (это не изменит результат решения, но значительно его упростит).
5. Запишите второй закон Ньютона в векторном виде и в проекциях на оси координат. Запишите формулы для вычисления сил. Получив систему уравнений, решите ее относительно неизвестной величины. Если в задаче есть дополнительные условия, используйте их.
6. Проверьте единицу и найдите числовое значение искомой величины. Проанализируйте результат, запишите ответ.

При решении задач систему отсчета будем связывать с точкой, неподвижной относительно поверхности Земли (то есть тело движется, а оси координат остаются неподвижными); тело будем считать материальной точкой, поэтому все силы будем изображать приложенными к одной точке.

**Задача 1.** Деревянный брусок массой 200 г равномерно тянут по горизонтальной поверхности с помощью пружины жесткостью 40 Н/м. Определите удлинение пружины, если коэффициент трения скольжения 0,25.

*Анализ физической проблемы.* Чтобы вычислить удлинение пружины, нужно знать силу упругости — ее найдем, воспользовавшись вторым законом Ньютона. Следует учесть, что брусок тянут равномерно, поэтому ускорение его движения равно нулю.

Выполним пояснительный рисунок, на котором укажем силы, действующие на тело, и направления осей координат.



*Дано:*

$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

$$k = 40 \text{ Н/м}$$

$$\mu = 0,25$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

*Найти:*

$x$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Запишем второй закон Ньютона в векторном виде:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}} = 0.$$

Найдем проекции сил на оси  $OX$  и  $OY$ , запишем формулы для вычисления силы упругости и силы трения скольжения:

$$\begin{cases} OX: -F_{\text{тр}} + F_{\text{упр}} = 0 \text{ (так как } mg_x = 0, N_x = 0), \\ OY: N - mg = 0 \text{ (так как } F_{\text{тр}y} = 0, F_{\text{упр}y} = 0), \\ F_{\text{тр}} = \mu N, \\ F_{\text{упр}} = kx. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, найдем  $x$ :

$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тр}} = \mu mg; F_{\text{упр}} = F_{\text{тр}} \Rightarrow kx = \mu mg \Rightarrow x = \frac{\mu mg}{k}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

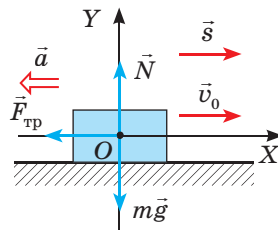
$$[x] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н}}{\text{Н/м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; x = \frac{0,25 \cdot 0,2 \cdot 10}{40} = 0,0125 \text{ (м)}.$$

*Ответ:*  $x = 12,5 \text{ мм}$ .

**Задача 2.** Вычислите тормозной путь и время торможения автомобиля, если он двигался по прямому горизонтальному участку дороги и перед началом торможения имел скорость 54 км/ч. Коэффициент трения скольжения резины по бетону — 0,75.

*Анализ физической проблемы.* Чтобы определить тормозной путь и время торможения автомобиля, необходимо знать ускорение его движения. Ускорение найдем, воспользовавшись вторым законом Ньютона.

Выполним пояснительный рисунок, на котором укажем силы, действующие на автомобиль, оси координат, направления начальной скорости, перемещения и ускорения (автомобиль останавливается, поэтому  $\vec{v}_{\text{кон}} = 0$  и  $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0$ ).



*Дано:*

$$v_0 = 54 \text{ км/ч} = 15 \text{ м/с}$$

$$\mu = 0,75$$

$$v = 0$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

*Найти:*

$s$  — ?  
 $t$  — ?

*Поиск математической модели, решение*

Согласно второму закону Ньютона:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

Найдем проекции сил и ускорения на оси  $OX$  и  $OY$ , запишем формулу для вычисления силы трения скольжения:

$$\begin{cases} OX: -F_{\text{тр}} = -ma \text{ (так как } mg_x = 0, N_x = 0), \\ OY: N - mg = 0 \text{ (так как } F_{\text{тр}y} = 0, a_y = 0), \\ F_{\text{тр}} = \mu N. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, найдем  $a$ :

$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тр}} = \mu mg \Rightarrow \mu mg = ma \Rightarrow a = \mu g.$$

Тормозной путь и время движения определим, воспользовавшись формулами:

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

Учитывая, что  $v_x = 0$ ;  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = -a$ ;  $s_x = s$ , имеем:  $s = \frac{v_0^2}{2a}$ ;  $0 = v_0 - at$ .

Следовательно,  $v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}$ . Учитывая, что  $a = \mu g$ , получаем:

$$s = \frac{v_0^2}{2\mu g}; \quad t = \frac{v_0}{\mu g}.$$

Проверим единицы, найдем значения искомых величин:

$$[s] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}} = \text{м}, \quad s = \frac{15^2}{15} = 15 \text{ (м)}; \quad [t] = \frac{\text{м}/\text{с}}{\text{м}/\text{с}^2} = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{с}, \quad t = \frac{15}{7,5} = 2 \text{ (с)}.$$

*Анализ результатов.* Получен реальный результат: *тормозной путь автомобиля действительно достаточно велик. Помните об этом и никогда не нарушайте правила дорожного движения!*

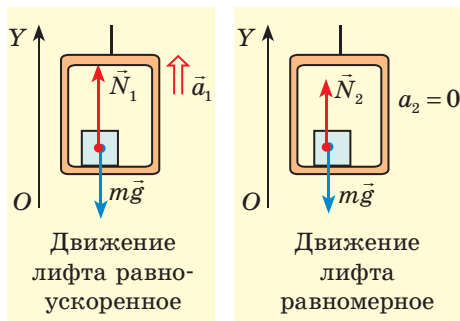
*Ответ:*  $s = 15 \text{ м}$ ;  $t = 2 \text{ с}$ .

**Задача 3.** Человек массой 70 кг зашел в лифт. Лифт начинает движение с ускорением  $0,2 \text{ м/с}^2$ , направленным вверх, а затем поднимается с постоянной скоростью. На сколько изменяется вес человека во время этого движения?

### Анализ физической проблемы

Вес тела — это сила, действующая на опору — лифт. По третьему закону Ньютона сила, с которой тело действует на опору, равна силе, с которой опора действует на тело:  $P = N$ . Значит, нужно найти силу нормальной реакции опоры, действующую на человека при каждом виде движения лифта.

Выполним пояснительные рисунки, на которых укажем силы, действующие на человека, направление ускорения и направление оси  $OY$ .



Дано:

$m = 70$  кг  
 $a_1 = 0,2$  м/с<sup>2</sup>  
 $a_2 = 0$   
 $g = 10$  м/с<sup>2</sup>

Найти:

$P_1 - P_2$  — ?

Поиск математической модели, решение

Запишем второй закон Ньютона для каждого случая и найдем проекции сил и ускорения на ось  $OY$ .

1. Движение равноускоренное:  $\vec{N}_1 + m\vec{g} = m\vec{a}_1$ ;

$OY$ :  $N_1 - mg = ma_1 \Rightarrow N_1 = ma_1 + mg = m(a_1 + g)$ .

Значит,  $P_1 = m(a_1 + g)$ .

2. Движение равномерное:  $\vec{N}_2 + m\vec{g} = 0$ ;

$OY$ :  $N_2 - mg = 0 \Rightarrow N_2 = mg$ . Значит,  $P_2 = mg$ .

Найдем значения искомых величин:

$P_1 = 70(0,2 + 10) = 714$  (Н);  $P_2 = 70 \cdot 10 = 700$  (Н);  $P_1 - P_2 = 14$  Н.

Ответ:  $P_1 - P_2 = 14$  Н.

**Задача 4.** Автомобиль массой 4 т поднимается в гору, замедляя движение. Определите силу тяги автомобиля, если уклон горы — 0,02, а коэффициент сопротивления движению — 0,04. Ускорение автомобиля — 0,15 м/с<sup>2</sup>.

Обратите внимание!

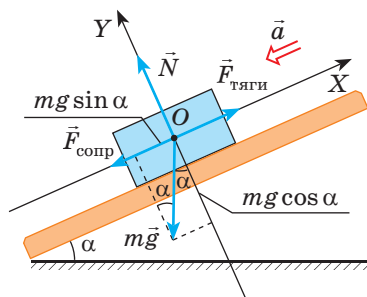
Уклон дороги — синус угла  $\alpha$  наклона полотна дороги к горизонту. Если уклон невелик (меньше 0,1), то  $\cos \alpha \approx 1$ .

Коэффициент сопротивления движению  $\mu$  учитывает все виды трения: качения, скольжения в осях и т. д. Сила сопротивления направлена противоположно движению тела и вычисляется по формуле:  $F_{\text{сопр}} = \mu N$ .

### Анализ физической проблемы

На тело действуют четыре силы: сила тяжести  $m\vec{g}$ , сила  $\vec{N}$  нормальной реакции опоры, сила тяги  $\vec{F}_{\text{тяги}}$  и сила сопротивления  $\vec{F}_{\text{сопр}}$ . Скорость тела уменьшается, поэтому ускорение направлено противоположно направлению движения тела.

Выполним пояснительный рисунок, указав силы, действующие на тело, направления осей координат и ускорения движения тела.





**Дано:**

$m = 4 \cdot 10^3 \text{ кг}$

$\sin \alpha = 0,02$

$\mu = 0,04$

$a = 0,15 \text{ м/с}^2$

$g = 10 \text{ м/с}^2$

**Найти:**

$F_{\text{тяги}} \text{ — ?}$

**Поиск математической модели, решение**

Запишем второй закон Ньютона в векторном виде:

$$\vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{сопр}} = m\vec{a}.$$

Спроектируем уравнение на оси координат (сила  $m\vec{g}$  не лежит на оси координат, поэтому для нахождения ее проекций опустим от конца вектора  $m\vec{g}$  перпендикуляры на оси  $OX$  и  $OY$ :  $mg_x = -mg \sin \alpha$ ;  $mg_y = -mg \cos \alpha$ ) и запишем выражение для  $F_{\text{сопр}}$ :

$$\begin{cases} OX: F_{\text{тяги}} - F_{\text{сопр}} - mg \sin \alpha = -ma, \\ OY: N - mg \cos \alpha = 0, \\ F_{\text{сопр}} = \mu N; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_{\text{тяги}} = F_{\text{сопр}} + mg \sin \alpha - ma, \\ N = mg \cos \alpha, \\ F_{\text{сопр}} = \mu mg \cos \alpha. \end{cases}$$

Подставив выражение для  $F_{\text{сопр}}$  в первое уравнение системы, найдем  $F_{\text{тяги}}$ :

$$F_{\text{тяги}} = \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha - ma = m(\mu g \cos \alpha + g \sin \alpha - a).$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[F_{\text{тяги}}] = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2 = \text{Н}; F_{\text{тяги}} = 4 \cdot 10^3 \cdot (0,04 \cdot 10 + 10 \cdot 0,02 - 0,15) = 1,8 \cdot 10^3 \text{ (Н)};$$

**Ответ:**  $F_{\text{тяги}} = 1,8 \text{ кН}.$ **Вместо итогов**

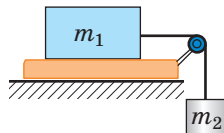
Вы ознакомились с решением некоторых задач на движение тел под действием нескольких сил. Конечно, рассмотреть в рамках учебника все типы таких задач невозможно, да и не нужно. Главное — у вас есть алгоритм решения и примеры работы по этому алгоритму. Остальное — за вами.

Итак, решая задачу по динамике, сначала выполните пояснительный рисунок, укажите силы, запишите уравнение второго закона Ньютона, выберите систему отсчета, найдите проекции. Нужно знать, как направлены силы, когда они возникают и по каким формулам их определяют. А дальше, даже если вы сразу не видите всего хода решения задачи, — ничего страшного. Вы обязательно найдете какую-то величину, знание которой поможет вам увидеть дальнейший ход решения. Можно даже сказать так: «Если не знаешь, как решать задачу, то начни ее решать». Не нужно бояться сделать ошибочный шаг. Тот не побеждает, кто не умеет проигрывать. Научиться решать задачи по физике может каждый, нужно только их решать!

**Упражнение № 35**

1. Во время старта космический корабль движется вертикально вверх с ускорением  $40 \text{ м/с}^2$ . С какой силой космонавт массой  $70 \text{ кг}$  давит на кресло?
2. Деревянный брусок массой  $200 \text{ г}$  равномерно тянут по горизонтальной поверхности, прикладывая силу  $1 \text{ Н}$ . Определите коэффициент трения скольжения.
3. Тело массой  $300 \text{ г}$ , подвешенное на пружине, вместе с пружиной опускают с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Определите жесткость пружины, если ее удлинение составило  $5 \text{ см}$ .
4. Груз массой  $10 \text{ кг}$  и объемом  $1 \text{ дм}^3$  извлекают из воды с помощью веревки. Определите силу натяжения веревки, если груз движется с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Соппротивление воды не учитывайте.

5. Лыжник массой 60 кг, набравший за время спуска скорость 10 м/с, выехал на горизонтальный участок и остановился через 40 с. Определите силу трения на горизонтальном участке и коэффициент трения скольжения.
6. Автомобиль массой 3 т съезжает с горы, развивая силу тяги 3000 Н. С каким ускорением движется автомобиль, если коэффициент сопротивления движению 0,04, а уклон горы — 0,03?
7. Тело массой  $m_1 = 1$  кг скользит по горизонтальной поверхности под действием груза массой  $m_2 = 250$  г (см. рисунок). Система тел движется с ускорением  $1,5 \text{ м/с}^2$ . Найдите коэффициент трения скольжения.



## § 36. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ИМПУЛЬС. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

### История понятия импульса

В XIV в. французский философ и механик *Жан Буридан* (1300–1358) применил известное в философии понятие *impetus* (толчок к чему-нибудь, побуждение) для объяснения причины движения тел. Он писал: «Человек, бросающий камень, движет свою руку вместе с ним, а при стрельбе из лука тетива какое-то время движется вместе со стрелой, толкая стрелу... Пока то, что толкает, контактирует с телом... тело непрерывно приобретает *impetus*, поэтому его движение становится все быстрее. После отрыва... движет тело только приобретенный *impetus*, который из-за сопротивления среды ослабевает, и поэтому движение становится все медленнее».



Из курса физики 7 класса вы узнали о законе сохранения механической энергии, из курса физики 8 класса — о законе сохранения электрического заряда. В данном параграфе вы познакомитесь с еще одной физической величиной, имеющей свойство сохраняться (то есть не изменяться при взаимодействии тел).

### 1 Узнаём, при каких условиях систему можно считать замкнутой

Несколько тел, взаимодействующих друг с другом, образуют *систему тел*. Силы, характеризующие взаимодействие тел системы между собой, называют *внутренними силами системы*.

Система тел называется **замкнутой** (изолированной), если на тела не действуют внешние силы, а любое изменение состояния системы — результат действия внутренних сил.

Строго говоря, на Земле невозможно найти замкнутую систему тел: на любое тело действует сила тяжести, любое движение тел сопровождается трением. Поэтому на практике система тел считается замкнутой, если *внешние силы, действующие на систему, уравновешены или намного меньше внутренних сил системы*.

Например, в момент взрыва фейерверка (рис. 36.1, а) внешние силы, действующие на его «осколки» (сила тяжести и сила сопротивления), во много раз меньше сил,

с которыми «осколки» отталкиваются, поэтому во время взрыва систему тел «осколки» можно считать замкнутой. А вот после взрыва притяжением Земли и сопротивлением воздуха пренебречь нельзя — система тел «осколки» будет незамкнутой.

Если человек толкает ядро, стоя на легкоподвижной тележке (рис. 36.1, б), то систему тел «человек на тележке — ядро» можно считать замкнутой, ведь силу тяжести уравнивает сила нормальной реакции опоры, а сила трения качения незначительна. Если же человек толкает ядро, стоя на земле, то система тел «человек — ядро» незамкнута, потому что сила трения сравнима с силой взаимодействия человека и ядра.

## 2 Вычисляем импульс тела

Вспомним формулу для определения ускорения:  $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$  — и запишем *второй закон Ньютона* в ином виде:

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}, \text{ или:}$$

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$$

В правой части последнего равенства имеем изменение некой векторной величины  $m\vec{v}$ . Эту физическую величину называют *импульсом тела* или *количеством движения*.

**Импульс тела** — это векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения:

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

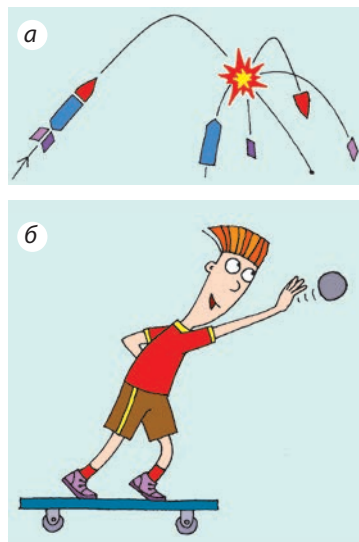
*Единица импульса тела в СИ — килограмм-метр в секунду:*

$$[p] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Воспользуемся законами Ньютона и докажем: если тела образуют замкнутую систему, их суммарный импульс при взаимодействии не изменяется.

## 3 Доказываем закон сохранения импульса

Рассмотрим взаимодействие двух тел массами  $m_1$  и  $m_2$  (рис. 36.2). Тела образуют замкнутую систему и движутся со скоростями  $\vec{v}_{01}$  и  $\vec{v}_{02}$  соответственно.



**Рис. 36.1.** Если внешние силы, действующие на систему, уравновешены или значительно меньше внутренних сил системы, эту систему можно считать замкнутой

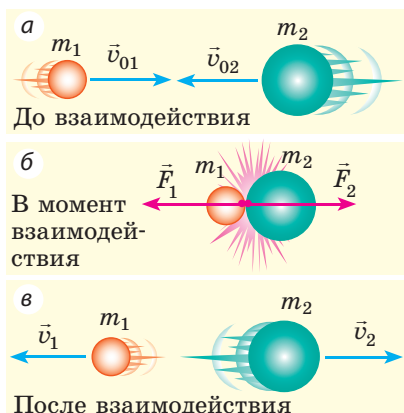
### Импульс тела

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

$\vec{p}$  — импульс тела

$m$  — масса тела

$\vec{v}$  — скорость движения тела



**Рис. 36.2.** К выведению закона сохранения импульса

В результате взаимодействия, длящегося некоторый интервал времени  $t$ , оба тела изменяют скорость своего движения до  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ . Система замкнута, поэтому причиной изменения скорости движения тел являются только силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  — внутренние силы системы. Согласно третьему закону Ньютона эти силы равны по модулю и противоположны по направлению:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .

Запишем для каждого тела второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_1 t = m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01}; \quad \vec{F}_2 t = m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}.$$

Поскольку  $\vec{F}_1 t = -\vec{F}_2 t$ , имеем:

$$m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01} = -(m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}).$$

После преобразований получаем:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2, \text{ или}$$

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

Таким образом, несмотря на то что после взаимодействия импульс каждого тела изменился, *суммарный импульс системы остался неизменным — он сохранился.*

Итак, **закон сохранения импульса:**

В замкнутой системе тел векторная сумма импульсов тел до взаимодействия равна векторной сумме импульсов тел после взаимодействия.

Закон сохранения импульса выполняется для замкнутой системы, содержащей любое количество тел, — это фундаментальный закон физики. В общем виде закон сохранения импульса записывают так:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} =$$

$$= m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n,$$

где  $n$  — количество тел системы.

С проявлениями закона сохранения импульса мы постоянно имеем дело в технике, природе, быту и т. д. (рис. 36.3).



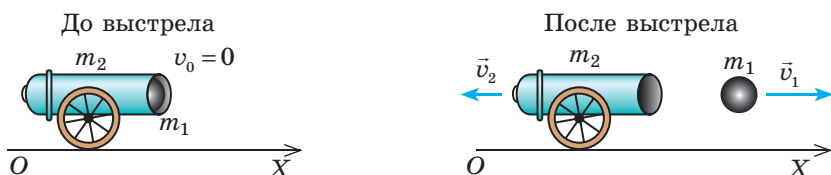
**Рис. 36.3.** Движение бильярдных шаров после удара друг о друга (а); отдача отбойного молотка (б) — появление этих движений является следствием закона сохранения импульса

**Обратите внимание:** закон сохранения импульса выполняется *только* для замкнутой системы тел, поэтому, прежде чем применить его для решения задачи, нужно выяснить, является ли система замкнутой.

#### 4 Учимся решать задачи

**Задача.** Из пушки, установленной на твердой и ровной горизонтальной поверхности, горизонтально выпущен снаряд со скоростью 100 м/с. Какую скорость движения приобрела пушка после выстрела, если масса снаряда равна 20 кг, а масса пушки — 2 т?

**Анализ физической проблемы.** Систему тел «снаряд — пушка» можно считать замкнутой, поскольку силы трения намного меньше сил, возникающих во время выстрела. Выберем систему отсчета, связанную с точкой на поверхности Земли. Выполним пояснительный рисунок, на котором укажем ось  $OX$  и направления скоростей движения тел до и после взаимодействия:



Дано:

$$v_1 = 100 \text{ м/с}$$

$$m_1 = 20 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$v_{01} = v_{02} = 0$$

Найти:

$$v_2 - ?$$

**Поиск математической модели, решение**

Запишем закон сохранения импульса в векторном виде:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.$$

Воспользовавшись рисунком, спроектируем полученное уравнение на ось  $OX$ :  $0 = m_1 v_1 - m_2 v_2$ . Отсюда найдем  $v_2$ :

$$m_2 v_2 = m_1 v_1 \Rightarrow v_2 = \frac{m_1 v_1}{m_2}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[v_2] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}}{\text{кг}} = \text{м/с}; \quad v_2 = \frac{20 \cdot 100}{2 \cdot 10^3} = 1 \text{ (м/с)}.$$

**Ответ:**  $v_2 = 1 \text{ м/с}$ .



#### Подводим итоги

Импульс тела  $\vec{p}$  — это векторная физическая величина, равная произведению массы  $m$  тела на скорость  $\vec{v}$  его движения:  $\vec{p} = m \vec{v}$ .

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: векторная сумма импульсов тел до взаимодействия равна векторной сумме импульсов тел после взаимодействия:  $m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} + \dots + m_n \vec{v}_{0n} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n$ .



#### Контрольные вопросы

**1.** Какую систему можно считать замкнутой? Приведите примеры. **2.** Дайте определение импульса тела. Какова единица импульса тела в СИ? **3.** Сформулируйте закон сохранения импульса. **4.** Докажите закон сохранения импульса для системы двух тел.





### Упражнение № 36

1. Футболист ведет мяч массой 4,5 кг, двигаясь со скоростью 4 м/с относительно поверхности Земли. Определите импульс мяча относительно: а) поверхности Земли; б) футболиста, ведущего мяч; в) футболиста, бегущего навстречу мячу со скоростью 5 м/с.
2. Шар массой 100 г, движущийся с некоторой скоростью, попадает в неподвижный шар массой 150 г и застревает в нем (рис. 1). Определите скорость движения шара до столкновения, если после столкновения система двигалась со скоростью 10 м/с.
3. Составьте и решите задачу, используя рис. 2.

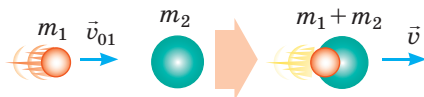


Рис. 1

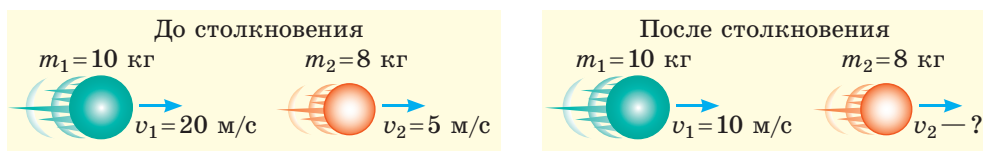


Рис. 2

4. С лодки массой 200 кг, движущейся со скоростью 2 м/с, прыгает мальчик массой 50 кг со скоростью 6 м/с. Найдите скорость лодки после прыжка мальчика, если он прыгает: а) с кормы горизонтально, в сторону, противоположную движению лодки; б) с носа лодки горизонтально, в направлении ее движения; в) с носа лодки под углом  $60^\circ$  к горизонту, в сторону движения лодки.
5. Если лодка приблизится к берегу, а человек в лодке, не дождавшись, когда ее пришвартуют, встанет и пойдет вперед, лодка отплывет от берега (рис. 3). Объясните эту ситуацию с точки зрения закона сохранения импульса. Определите расстояние  $s$ , на которое отплывет лодка от берега, если масса человека 70 кг, масса лодки 130 кг, длина лодки  $l = 4$  м. Сопротивление воды не учитывайте.
6. Сравните ваш импульс во время бега на 100 м и импульс пули. Данные задайте самостоятельно.

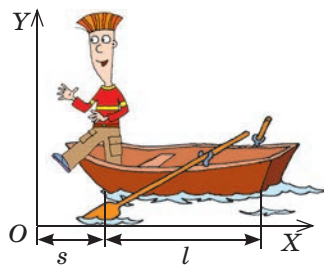


Рис. 3

### Физика и техника в Украине



**Кирилл Дмитриевич Синельников** (1901–1966) — выдающийся украинский советский физик-экспериментатор, академик.

К. Д. Синельников — соратник *И. В. Курчатова*; вошел в историю науки как известный ученый в области физики диэлектриков и полупроводников, физики атомного ядра, физического материаловедения, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, физической и электронной оптики. В 1928–1930 гг. К. Д. Синельников стажировался в Кембридже, в лаборатории Э. Резерфорда. В 1944–1965 гг. ученый возглавлял Харьковский физико-технический институт, где под его руководством впервые было осуществлено расщепление ядра Лития протонами.

Президиум АН УССР установил премию им. К. Д. Синельникова за выдающиеся работы в области ядерной физики.

## § 37. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Благодаря чему могут двигаться люди, автомобили, животные? Почему летают планеры, птицы, бабочки? Почему плавают рыбы, катера, подводные лодки? Ответ прост: все перечисленные тела от чего-то отталкиваются: человек, животное, автомобиль — от поверхности Земли; планеры, птицы, бабочки — от воздуха; рыбы и катера — от воды. А как объяснить движение космического летательного аппарата, ведь он не может от чего-то оттолкнуться? Но космические корабли летают в открытом космосе, выполняют маневры, возвращаются на Землю. От чего же они отталкиваются? Выясним.

### 1 Узнаём о реактивном движении

Проведем простой опыт. Надуем воздушный шарик и, не стягивая его отверстие нитью, отпустим. Шарик придет в движение и будет двигаться до тех пор, пока из отверстия вырывается воздух. В данном случае мы имеем дело с *реактивным движением* (рис. 37.1).

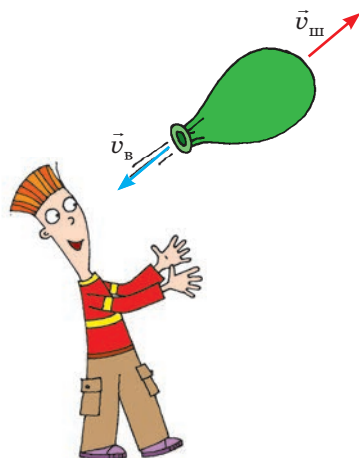
**Реактивное движение** — это движение, возникающее в результате отделения от тела его части с некоторой относительно этого тела скоростью.

*Основа реактивного движения — закон сохранения импульса.*

Вернемся к опыту с шариком. Если отверстие шарика закрыто, он находится в покое и импульс системы «шарик — воздух» равен нулю.

Если отверстие открыть, то воздух начнет вырываться наружу с довольно большой скоростью, то есть приобретет некоторый импульс:  $\vec{p}_B = m_B \vec{v}_B$ . Сам шарик тоже приобретет импульс:  $\vec{p}_Ш = m_Ш \vec{v}_Ш$ , направленный в сторону, противоположную направлению импульса воздуха.

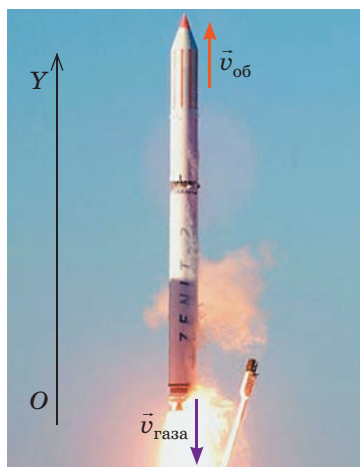
Представим, что система «шарик — воздух» замкнута. Тогда в соответствии с законом сохранения импульса общий импульс системы «шарик — воздух» остается неизменным и равен нулю:  $m_B \vec{v}_B + m_Ш \vec{v}_Ш = 0$ . Значит, скорость движения шарика  $\vec{v}_Ш = -\frac{m_B \vec{v}_B}{m_Ш}$ . Знак «-» означает, что шарик движется в направлении, противоположном движению воздуха.



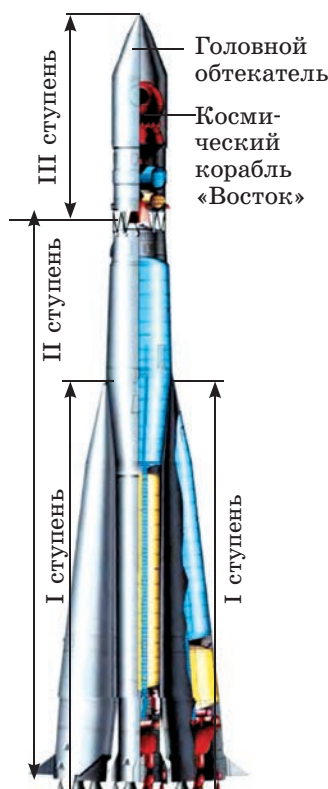
**Рис. 37.1.** Движение шарика под действием воздуха, вырывающегося из отверстия, — реактивное движение

Прообразом современных реактивных двигателей можно считать «шар Герона», или «эолипил». Это устройство было создано в I в. выдающимся древнегреческим математиком и механиком Героном из Александрии. Пар, выходящий из закрепленных на шаре согнутых трубочек (сопел), заставляет шар вращаться.





**Рис. 37.2.** Старт ракеты «Зенит» (сделана в Украине)



**Рис. 37.3.** Трехступенчатая ракета-носитель «Восток»

Рассмотрим еще один пример — отдачу автомата, делающего  $n$  выстрелов в секунду. Обозначим массу одной пули  $m_{\text{п}}$ , а ее скорость в момент вылета из дула —  $\vec{v}$ . Общий импульс, который приобретает пуля за секунду (скорость изменения импульса), составит  $n \cdot m_{\text{п}} \vec{v}$ . Сила  $\vec{F}$ , действующая на пулю, равна скорости изменения импульса пули:

$$\vec{F} = n \cdot m_{\text{п}} \vec{v}.$$

Согласно третьему закону Ньютона такая же по модулю сила, но направленная противоположно, действует и на автомат. Аналогично возникает движущая *реактивная сила* в ракете, когда из ее сопла выбрасывается газ.

## 2 Изучаем реактивное движение ракеты

**Ракета** — летательный аппарат, который перемещается в пространстве благодаря реактивной тяге, возникающей в результате отбрасывания ракетой части собственной массы.

Отделяемая часть ракеты — струя горячего газа, образующегося при сгорании топлива. Когда струя газа с огромной скоростью вырывается из сопла ракеты, оболочка ракеты получает мощный импульс, направленный в сторону, противоположную скорости движения струи (рис. 37.2).

**?** Двигатель ракеты — это тепловой двигатель. Что в этом двигателе служит нагревателем? рабочим телом? холодильником?

Представим невероятную ситуацию: в момент старта все топливо ракеты сгорает мгновенно. До старта ракета находится в покое, поэтому закон сохранения импульса после сгорания топлива выглядел бы так:  $0 = m_{\text{об}} \vec{v}_{\text{об}} + m_{\text{газа}} \vec{v}_{\text{газа}}$ , где  $m_{\text{об}} \vec{v}_{\text{об}}$  — импульс оболочки ракеты;  $m_{\text{газа}} \vec{v}_{\text{газа}}$  — импульс газа. Направим ось  $OY$  в сторону движения ракеты (см. рис. 37.2); спроектировав векторное уравнение на эту ось, имеем:  $0 = m_{\text{об}} v_{\text{об}} - m_{\text{газа}} v_{\text{газа}}$ , откуда:

$$v_{\text{об}} = \frac{m_{\text{газа}}}{m_{\text{об}}} v_{\text{газа}}.$$

Если предположить, что масса топлива в 4 раза больше массы оболочки ( $m_{\text{газа}} = 4m_{\text{об}}$ ),

а скорость струи газа  $v_{\text{газа}} = 2$  км/с (приблизительно с такой скоростью из сопла ракеты вырывается раскаленный газ), получим скорость движения оболочки ракеты:  $v_{\text{об}} = 4v_{\text{газа}} = 8$  км/с\*.

Итак, если бы топливо ракеты сгорало мгновенно, а движению ракеты ничего не препятствовало, то скорость, набранная ракетой, была бы достаточной для того, чтобы вывести ракету на орбиту Земли. Однако в реальности топливо сгорает постепенно, а на движение ракеты заметно влияет сопротивление воздуха. Расчеты показывают, что для достижения необходимой скорости масса топлива должна в 200 раз превышать массу оболочки, а это нереально реализовать технически.

Еще в начале XX в. было доказано, что одноступенчатая ракета не сможет покинуть Землю. Это могут сделать только многоступенчатые ракеты — в них ступени с опустевшими топливными резервуарами отбрасываются в полете (и затем сгорают в атмосфере из-за трения о воздух); при этом масса ракеты уменьшается, соответственно увеличивается скорость ее движения. Заметим, что все ракеты-носители космических аппаратов, как самые первые, так и современные, — многоступенчатые.

На рис. 37.3 представлена трехступенчатая ракета-носитель «Восток». Она состоит из четырех боковых блоков (I ступень), расположенных вокруг центрального блока (II ступень). Космический аппарат устанавливается на III ступени, под головным обтекателем, защищающим аппарат во время полета в плотных слоях атмосферы. Каждый блок оснащен собственными реактивными двигателями.

12 апреля 1961 г. ракета-носитель «Восток» вывела на орбиту космический корабль «Восток», на борту которого находился первый в мире космонавт Ю. А. Гагарин (рис. 37.4). Этот полет был осуществлен по инициативе и под руководством выдающегося конструктора *Сергея Павловича Королева* (1907–1966), уроженца г. Житомира.



**Рис. 37.4.** Юрий Алексеевич Гагарин (1934–1968) — советский летчик-космонавт, первый человек в мире, осуществивший полет в космос (12 апреля 1961 г.)



### Контрольные вопросы

**1.** Дайте определение реактивного движения. **2.** Опишите опыты по наблюдению реактивного движения. **3.** Запишите закон сохранения импульса для движения ракеты, предположив, что все ее топливо сгорает мгновенно в момент старта. **4.** Почему для запуска космических кораблей с поверхности Земли используют многоступенчатые ракеты? **5.** Назовите имя первого в истории человечества космонавта и имя конструктора, под руководством которого был осуществлен первый полет человека в космос.

\* Заметим: 8 км/с — это *первая космическая скорость*. Такую скорость без учета сопротивления воздуха должно иметь тело в момент запуска с поверхности Земли, чтобы стать ее искусственным спутником.



### Упражнение № 37

1. «Сегнерово колесо» (рис. 1) — устройство, изобретенное венгерским ученым и механиком Яношем Сегнером (1704–1777), — сейчас применяется для полива газонов. Рассмотрите рис. 1 и объясните, как работает это устройство. Можно ли считать «сегнерово колесо» реактивным двигателем? Поясните свой ответ.
2. Скорость стрельбы скорострельного пулемета, который вы, возможно, видели в фильме «Матрица», достигает 10 000 выстрелов в минуту; он выпускает пули массой 10 г со скоростью 600 м/с. Какова сила отдачи такого оружия? Действительно ли можно стрелять, держа его в руках?
3. От ракеты, двигавшейся со скоростью 2,4 км/с, отделилась первая ступень, масса которой составляла четверть массы ракеты. С какой скоростью начала двигаться ракета, если скорость движения первой ступени после отделения равна 900 м/с относительно ракеты.
4. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте об украинских космонавтах.
5. Воспользуйтесь дополнительными источниками информации и узнайте, как движется кальмар; какие существа используют реактивное движение; где еще можно наблюдать реактивное движение в природе.



Рис. 1



### Экспериментальное задание

Из пластиковой бутылки и трубочек для коктейля изготовьте «сегнерово колесо» (рис. 2) и проверьте, как работает это устройство.



Рис. 2

## Физика и техника в Украине



**Сергей Павлович Королев** (1907–1966) — академик, всемирно известный украинский советский ученый в области ракетостроения и космонавтики, конструктор первых искусственных спутников Земли и космических кораблей.

Под руководством С. П. Королева была разработана и создана серия уникальных ракет-носителей, обеспечивших настоящий прорыв в исследовании космоса: запуск первого в истории искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.); первый в истории космический полет космонавта *Юрия Алексеевича Гагарина* на корабле «Восток» (12 апреля 1961 г.); вывод на орбиту первого многоместного корабля серии «Восход» с экипажем на борту (12 октября 1964 г.); первый выход в открытый космос космонавта *А. А. Леонова* (18 марта 1965 г.). С. П. Королев воспитал плеяду своих многочисленных последователей — ученых, конструкторов, инженеров.

Интересно, что первый космонавт из Украины *П. Р. Попович*, ракету с которым в 1962 г. вывел на орбиту С. П. Королев, запел из космоса для главного конструктора его любимую песню «Дивлюсь я на небо...».

В Житомире, на родине конструктора, открыт Музей космонавтики им. С. П. Королева, на центральной площади города ему установлен памятник.





# § 38. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА В МЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

Решение многих практических задач значительно упрощается, если воспользоваться законами сохранения — законом сохранения импульса и законом сохранения и превращения энергии, ведь эти законы можно использовать и тогда, когда силы, действующие в системе, неизвестны. Итак, вспомним виды механической энергии и решим несколько задач на применение законов сохранения.

## 1 Вспоминаем о механической энергии

**Энергия** (от греч. «деятельность») — это физическая величина, которая является общей мерой движения и взаимодействия всех видов материи.

Энергию обозначают символом  $E$  (или  $W$ ). Единица энергии в СИ — джоуль:

$$[E] = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В механике мы имеем дело с *механической энергией*.

**Механическая энергия** — это физическая величина, которая является мерой движения и взаимодействия тел и характеризует способность тел выполнять механическую работу.

Виды механической энергии		
Кинетическая энергия $E_k$ — энергия, обусловленная движением тела	Потенциальная энергия $E_p$ — энергия, обусловленная взаимодействием тел или частей тела	
$E_k = \frac{mv^2}{2}$ $m$ — масса тела $v$ — модуль скорости движения тела 	$E_p$ поднятого тела: $E_p = mgh$ $m$ — масса тела $h$ — высота относительно нулевого уровня 	$E_p$ упруго деформированной пружины (шнура): $E_p = \frac{kx^2}{2}$ $k$ — жесткость пружины (шнура) $x$ — удлинение 
Сумма кинетической и потенциальной энергий тела (системы тел) — это <b>полная механическая энергия тела (системы тел)</b> : $E = E_k + E_p$		

Изучая механическую энергию в курсе физики 7 класса, вы узнали о том, что, *когда система тел замкнута, а тела системы взаимодействуют друг с другом только силами упругости и силами тяготения, полная механическая энергия системы не изменяется.*

В этом состоит **закон сохранения и превращения механической энергии**, который математически можно записать так:

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p,$$

где  $E_{k0} + E_{p0}$  — полная механическая энергия системы тел в начале наблюдения;  $E_k + E_p$  — полная механическая энергия системы тел в конце наблюдения.

## 2 Вспоминаем алгоритм решения задач на закон сохранения механической энергии

### Алгоритм решения задач с применением закона сохранения механической энергии

1. Прочитайте условие задачи. Определите, 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 и превращения механической энергии. Конкретизируйте эту запись, используя данные задачи и соответствующие формулы для расчета энергии.
4. Решите полученное уравнение относительно неизвестной величины. Проверьте ее единицу и найдите числовое значение.
5. Проанализируйте результат, запишите ответ.

Закон сохранения механической энергии значительно упрощает решение многих практических задач. Рассмотрим алгоритм решения таких задач на конкретном примере.

**Задача 1.** Участник аттракциона по банджи-джампингу прыгает с моста (см. рисунок). Какова жесткость резинового каната, к которому привязан спортсмен, если во время падения шнур растянулся от 40 до 100 м? Масса спортсмена 72 кг, начальная скорость его движения равна нулю. Сопротивление воздуха не учитывайте.

*Анализ физической проблемы.* Сопротивление воздуха не учитываем, поэтому систему тел «Земля — человек — шнур» можно считать замкнутой и для решения задачи воспользоваться законом сохранения механической энергии: в начале прыжка спортсмен имеет потенциальную энергию поднятого тела, в самой низкой точке эта энергия преобразуется в потенциальную энергию деформированного шнура.



**Дано:**

$$l_0 = 40 \text{ м}$$

$$l = 100 \text{ м}$$

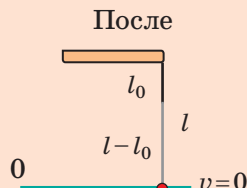
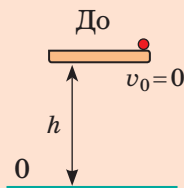
$$m = 72 \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

**Найти:** $k$  — ?**Поиск математической модели, решение**

Выполним рисунок, на котором укажем начальное и конечное положения спортсмена. За нулевой уровень выберем самое низкое положение спортсмена (шнур растянут максимально, скорость движения спортсмена равна нулю). Запишем закон сохранения механической энергии.



$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p.$$

$$E_{k0} = 0 \text{ (поскольку } v_0 = 0 \text{);}$$

$$E_{p0} = mgh, \text{ где } h = l \text{ — длина}$$

растянутого шнура

$$E_k = 0 \text{ (поскольку } v = 0 \text{);}$$

$$E_p = \frac{kx^2}{2}, \text{ где } x = l - l_0 \text{ — удли-$$

нение шнура

Следовательно:  $0 + mgl = 0 + \frac{k(l - l_0)^2}{2}$ . Окончательно получаем:  $k = \frac{2mgl}{(l - l_0)^2}$ .

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[k] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad k = \frac{2 \cdot 72 \cdot 10 \cdot 100}{(100 - 40)^2} = \frac{2 \cdot 72 \cdot 1000}{3600} = 40 \text{ (Н/м)}.$$

Ответ:  $k = 40 \text{ Н/м}$ .

**3**

### Применяем закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса одновременно

Играли ли вы в бильярд? Один из видов столкновения бильярдных шаров — **упругий центральный удар** — столкновение, при котором потери механической энергии отсутствуют, а скорости движения шаров до и после удара направлены вдоль прямой, проходящей через центры шаров.

**Задача 2.** Шар, двигавшийся по бильярдному столу со скоростью 5 м/с, сталкивается с неподвижным шаром такой же массы (см. рисунок). Определите скорости шаров после столкновения. Удар считайте упругим центральным.

**Анализ физической проблемы.** Систему двух шаров можно считать замкнутой, удар упругий центральный, значит, потери механической энергии отсутствуют. Следовательно, для решения задачи можно использовать и закон сохранения механической энергии, и закон сохранения импульса. За нулевой уровень выберем поверхность стола. Поскольку потенциальные энергии шаров до и после удара равны нулю, полная механическая энергия системы равна сумме кинетических энергий шаров.



**Дано:**

$$v_{01} = 5 \text{ м/с}$$

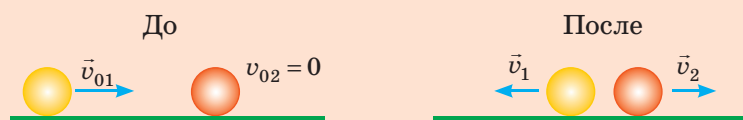
$$v_{02} = 0$$

$$m_1 = m_2 = m$$

**Найти:**

$$v_1 - ? \quad v_2 - ?$$

**Поиск математической модели, решение.** Выполним рисунок, на котором укажем положение шаров до и после удара.



Запишем для системы двух шаров закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии, учитывая, что  $v_{02} = 0$ :

$$\begin{cases} m\vec{v}_{01} = m\vec{v}_1 + m\vec{v}_2 \\ \frac{mv_{01}^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \vec{v}_{01} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2 \end{cases} \quad \text{Найдем проекции скоростей}$$

на ось  $OX$ :  $\begin{cases} v_{01} = -v_1 + v_2 \\ v_{01}^2 = v_1^2 + v_2^2 \end{cases}$  Так как  $v_{01} = 5 \text{ м/с}$ , имеем:  $\begin{cases} 5 = -v_1 + v_2 \\ 25 = v_1^2 + v_2^2 \end{cases}$

Решив последнюю систему, получим:  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 5 \text{ м/с}$ .



Решите последнюю систему уравнений самостоятельно.

**Анализ результатов.** Видим, что шары «обменялись» скоростями: шар 1 остановился, а шар 2 приобрел скорость шара 1 до столкновения.

**Заметим:** при упругом центральном ударе двух тел одинаковой массы эти тела «обмениваются» скоростями независимо от того, какими были начальные скорости движения тел.

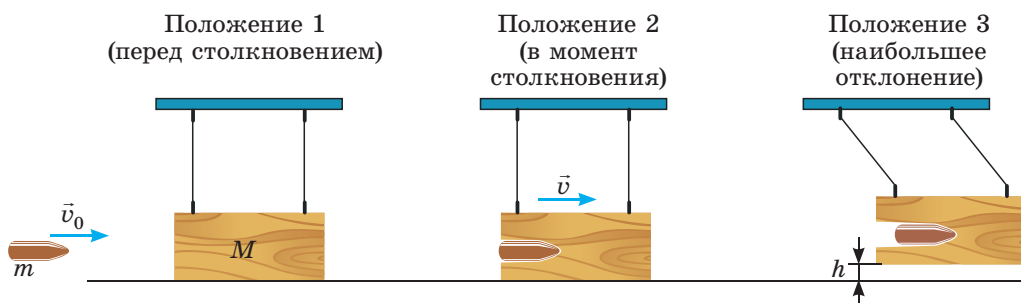
**Ответ:**  $v_1 = 0$ ;  $v_2 = 5 \text{ м/с}$ .

#### 4

### Применяем закон сохранения механической энергии и закон сохранения импульса поочередно

Если вам интересно, с какой скоростью вылетает стрела из лука или какова скорость движения пули пневматической винтовки, может помочь *баллистический маятник* — тяжелое тело, подвешенное на металлических стержнях. Узнаем, как с помощью этого устройства определить скорость движения пули.

**Задача 3.** Пуля массой 0,5 г попадает в подвешенный на стержнях деревянный брусок массой 300 г и застревает в нем. Определите, с какой скоростью двигалась пуля, если после попадания пули брусок поднялся на высоту 1,25 см (см. рисунок).



**Анализ физической проблемы.** При попадании пули в брусок последний приобретает скорость. Время проникновения пули в брусок мало, поэтому в это время систему «пуля — брусок» можно считать замкнутой и воспользоваться законом сохранения импульса. А вот законом сохранения механической энергии воспользоваться нельзя, так как присутствует сила трения.

Когда пуля остановила свое движение внутри бруска и он начал отклоняться, то действием силы сопротивления воздуха можно пренебречь и воспользоваться законом сохранения механической энергии для системы «Земля — брусок». А вот импульс бруска будет уменьшаться, поскольку часть импульса передается Земле.

**Дано:**

$$m = 0,5 \text{ г} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$M = 300 \text{ г} = 0,3 \text{ кг}$$

$$h = 1,25 \text{ см} = 0,0125 \text{ м}$$

**Найти:**

$v_0$  — ?

**Поиск математической модели, решение**

Запишем закон сохранения импульса для положений 1 и 2 (см. рисунок), приняв во внимание, что в положении 1 брусок находится в покое, а в положении 2 брусок и пуля движутся вместе:

$$m \vec{v}_0 + M \cdot 0 = (m + M) \cdot \vec{v}.$$

Спроектируем полученное уравнение на ось  $OX$ :

$$m v_0 = (m + M) \cdot v \Rightarrow v_0 = \frac{(m + M) \cdot v}{m} \quad (1).$$

Запишем закон сохранения механической энергии для положений 2 и 3 и конкретизируем его:

$$E_{k2} + E_{p2} = E_{k3} + E_{p3}.$$

$$E_{k2} = \frac{(m + M) \cdot v^2}{2};$$

$$E_{k3} = 0 \text{ (брусок остановился);}$$

$$E_{p2} = 0 \text{ (брусок на нулевом уровне).}$$

$$E_{p3} = (M + m)gh.$$

$$\text{Следовательно: } \frac{(m + M) \cdot v^2}{2} = (M + m)gh.$$

После сокращения на  $(M + m)$  получим:  $\frac{v^2}{2} = gh$ , или  $v = \sqrt{2gh}$  (2).

Подставив выражение для скорости (2) в формулу (1), получим формулу для определения скорости движения тела с помощью баллистического маятника:

$$v_0 = \frac{(m + M) \cdot \sqrt{2gh}}{m}.$$

Проверим единицу, найдем значение искомой величины:

$$[v_0] = \frac{\text{кг} \cdot \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}}{\text{кг}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad v_0 = \frac{300,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,0125}}{0,5 \cdot 10^{-3}} \approx 300 \text{ (м/с)}.$$

**Ответ:**  $v_0 \approx 300 \text{ м/с}.$



### Вместо итогов

Мы рассмотрели лишь несколько примеров решения задач. На первый взгляд кажется, что и импульс, и механическая энергия сохраняются не всегда. Что касается импульса — это не так. Закон сохранения импульса — это всеобщий закон Вселенной. А якобы «появление» импульса



(см. задачу 1 в § 38) и его «исчезновение» (см. задачу 3 в § 38, положения тел 2 и 3) объясняются тем, что Земля тоже получает импульс. Именно поэтому, решая задачи, мы «ищем» замкнутую систему.

*Механическая энергия действительно сохраняется не всегда:* система может получить дополнительную механическую энергию, если внешние силы выполняют положительную работу (например, вы бросили мяч); система может потерять часть механической энергии, если внешние силы выполнят отрицательную работу (например, велосипед остановился из-за действия силы трения). Однако *полная энергия* (сумма энергий тел системы и частиц, из которых эти тела состоят) *всегда остается неизменной. Закон сохранения энергии — это всеобщий закон Вселенной.*



### Упражнение № 38

Выполняя задания 2–4, сопротивлением воздуха следует пренебречь.

- Груз массой 40 кг сбросили с самолета. После того как на высоте 400 м скорость движения груза достигла 20 м/с, он начал двигаться равномерно. Определите: 1) полную механическую энергию груза на высоте 400 м; 2) полную механическую энергию груза в момент приземления; 3) энергию, в которую преобразовалась часть механической энергии груза.
- Шарик бросили горизонтально с высоты 4 м со скоростью 8 м/с. Определите скорость движения шарика в момент падения. Решите задачу двумя способами: 1) рассмотрев движение шарика как движение тела, брошенного горизонтально; 2) воспользовавшись законом сохранения механической энергии. Какой способ в данном случае удобнее?
- Пластилинный шарик 1 массой 20 г и втрое больший по массе шарик 2 подвешены на нитях. Шарик 1 отклонили от положения равновесия на высоту 20 см и отпустили. Шарик 1 столкнулся с шариком 2 и прилип к нему (рис. 1). Определите: 1) скорость движения шарика 1 до столкновения; 2) скорость движения шариков после столкновения; 3) максимальную высоту, на которую поднимутся шарики после столкновения.
- Шарик массой 10 г вылетает из пружинного пистолета, попадает в центр пластилинового бруска, подвешенного на нитях, и прилипает к нему. На какую высоту поднимется брусок, если перед выстрелом пружина была сжата на 4 см, жесткость пружины — 256 Н/м, а масса бруска — 30 г?

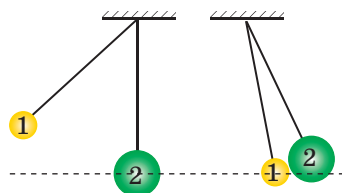


Рис. 1



### Экспериментальное задание

«Баллистический маятник». Изготовьте баллистический маятник (рис. 2).

Возьмите бумажную коробку и вылепите из пластилина еще одну коробку, немного меньшую по размеру. Вставьте пластилиновую коробку в бумажную и подвесьте устройство на нитях.

Испытайте устройство, измерив, например, скорость движения шарика детского пружинного пистолета. Для расчетов воспользуйтесь формулой, полученной при решении задачи 3 в § 38.

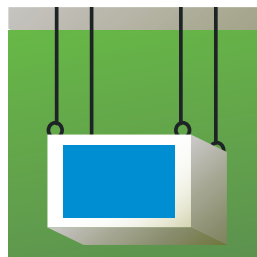


Рис. 2



**Тема.** Изучение закона сохранения механической энергии.

**Цель:** убедиться на опыте, что полная механическая энергия замкнутой системы тел остается неизменной, если в системе действуют только силы тяжести и силы упругости.

**Оборудование:** штатив с муфтой и лапкой, динамометр, набор грузов, линейка длиной 40–50 см, резиновый шнур длиной 15 см с указателем и петельками на концах, карандаш, прочная нить.

### Теоретические сведения

Для выполнения работы можно использовать экспериментальную установку, изображенную на рис. 1. Отметив на линейке положение указателя при ненагруженном шнуре (отметка 0), к петельке шнура подвешивают груз. Груз оттягивают вниз (положение 1), придав шнуру некоторое удлинение  $x_1$  (рис. 2). В положении 1 полная механическая энергия системы «шнур — груз — Земля» равна потенциальной энергии растянутого шнура:

$$E_1 = \frac{kx_1^2}{2} = \frac{F_1 x_1}{2}, \quad (1)$$

где  $F_1 = kx_1$  — модуль силы упругости шнура при его растяжении на  $x_1$ .

Затем груз отпускают и отмечают положение указателя в момент, когда груз достигнет максимальной высоты (положение 2). В этом положении полная механическая энергия системы равна сумме потенциальной энергии поднятого на высоту  $h$  груза и потенциальной энергии растянутого шнура:

$$E_2 = \frac{kx_2^2}{2} + mgh = \frac{F_2 x_2}{2} + P \cdot h, \quad (2)$$

где  $F_2 = kx_2$  — модуль силы упругости шнура при его растяжении на  $x_2$ ;  $P = mg$  — вес груза.

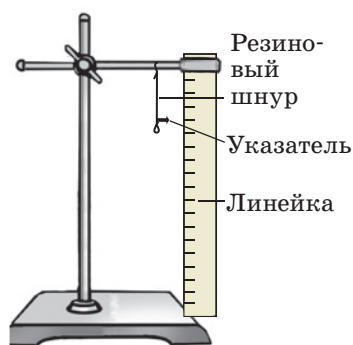


Рис. 1

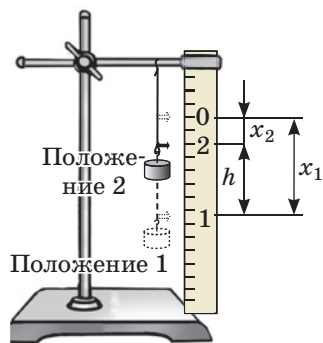


Рис. 2

### УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

#### II

#### Подготовка к эксперименту

- Прежде чем приступить к выполнению работы, вспомните:
  - требования безопасности при выполнении лабораторных работ;
  - закон сохранения полной механической энергии.
- Проанализируйте формулы (1) и (2). Какие измерения следует выполнить, чтобы определить полную механическую энергию системы в положении 1; в положении 2? Составьте план проведения эксперимента.

3. Соберите установку, как показано на рис. 1.
4. Потянув за нижнюю петельку шнура вертикально вниз, выпрямите шнур, не натягивая его. Обозначьте на линейке карандашом положение указателя при ненагруженном шнуре и поставьте отметку 0.



### Эксперимент

*Строго придерживайтесь инструкции по безопасности (см. форзац).*

Результаты измерений сразу заносите в таблицу.

1. Определите с помощью динамометра вес  $P$  груза.
2. Подвесьте груз к петельке. Оттянув груз вниз, отметьте на линейке положение 1 указателя, возле отметки поставьте цифру 1.
3. Отпустите груз. Заметив положение указателя в момент, когда груз достиг наибольшей высоты (положение 2), поставьте в соответствующем месте отметку 2. *Обратите внимание:* если отметка 2 будет выше отметки 0, опыт необходимо повторить, уменьшив растяжение шнура и соответственно изменив расположение отметки 1.
4. Измерьте силы упругости  $F_1$  и  $F_2$ , возникающие в шнуре при его растяжении на  $x_1$  и  $x_2$  соответственно. Для этого снимите груз и, зацепив петельку шнура крючком динамометра, растяните шнур сначала до отметки 1, а затем до отметки 2.
5. Измерив расстояния между соответствующими отметками, определите удлинения  $x_1$  и  $x_2$  шнура, а также максимальную высоту  $h$  подъема груза (см. рис. 2).
6. Повторите действия, описанные в пунктах 1–5, подвесив на шнур два груза вместе.

Номер опыта	Вес груза $P$ , Н	Удлинение шнура		Сила упругости		Высота подъема $h$ , м	Полная механическая энергия	
		$x_1$ , м	$x_2$ , м	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н		$E_1$ , Дж	$E_2$ , Дж
1								
2								



### Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого опыта определите:
  - 1) полную механическую энергию системы в положении 1;
  - 2) полную механическую энергию системы в положении 2.
2. Закончите заполнение таблицы.



### Анализ результатов эксперимента

Проанализируйте эксперимент и его результаты. Сформулируйте вывод, в котором: 1) сравните полученные вами значения полной механической энергии системы в положении 1; в положении 2; 2) укажите причины возможного расхождения результатов; 3) укажите физические величины, измерение которых, на ваш взгляд, дало наибольшую погрешность.

### \* Задание «со звездочкой»

По формуле  $\varepsilon = \left| 1 - \frac{E_1}{E_2} \right| \cdot 100\%$  оцените относительную погрешность эксперимента.

### + Творческое задание

Возьмите небольшой шарик на длинной прочной нити. К нити привяжите резиновый шнур и закрепите его так, чтобы шарик висел на расстоянии 20–30 см от пола. Потяните шарик вниз и измерьте удлинение шнура. Отпустив шарик, измерьте высоту, на которую он поднялся. Определите жесткость шнура и вычислите данную высоту теоретически. Сравните результат вычисления с результатом эксперимента. В чем возможные причины расхождений?

## § 39. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ

Исследование Вселенной всегда ставило перед учеными ряд вопросов, и прежде всего «Как устроена Вселенная, то есть какова ее структура?», «Как из небольших «кирпичиков» материи образуется все многообразие природных явлений и природных объектов?», «Одинаковым ли законам подчиняются разные природные явления?». Изучая физику, вы тоже старались найти ответы на эти вопросы. Попробуем обобщить.

### 1 Отвечаем на вопрос: «Какова структура Вселенной?»

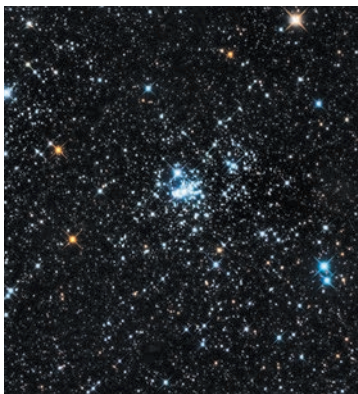
Всю доступную для наблюдения часть материального мира называют **Вселенной**.

Все объекты Вселенной и присущие им явления наука разделяет на три качественно разных уровня: *микромир*, *макромир*, *мегамир*. Объекты каждого уровня Вселенной отличаются прежде всего массой и размерами:

Структурные уровни Вселенной		
Микромир	Макромир	Мегамир
Мир молекул, атомов и их составляющих	Мир живых существ и др. физических тел	Мир планет, звезд, галактик
Размер $10^{-18}$ – $10^{-10}$ м Масса не более $10^{-10}$ кг	Размер $10^{-10}$ – $10^7$ м Масса $10^{-10}$ – $10^{20}$ кг	Размер более $10^7$ м Масса более $10^{20}$ кг

? Приведите примеры объектов микромира; макромира; мегамира.

Каждый структурный уровень Вселенной описывается собственной физической теорией. Так, движение и взаимодействие объектов микромира в основном описывает *квантовая механика*. В макромире «властвует» *классическая механика*, в основу которой положены законы механики Ньютона. Мегамир — это прежде всего объект *релятивистской механики*, которая базируется на теории относительности А. Эйнштейна.



**Рис. 39.1.** Классическая механика Ньютона выполняется только для описания движения тел со скоростью, которая намного меньше скорости распространения света. Движение тел, скорость которых сравнима со скоростью света (например, движение отдаленных галактик), описывает *специальная теория относительности*



**Рис. 39.2.** Излучение электромагнитных волн переменным электрическим током можно объяснить с помощью *классической электродинамики* Максвелла, а вот для объяснения излучения атомом света (электромагнитных волн оптического диапазона) нужно использовать *квантовую электродинамику*, которая содержит классическую динамику как составляющую

## 2 Узнаём, почему физические законы и теории имеют границы применимости

Почему, например, законы механики Ньютона нельзя применять для описания движения микрочастиц? Это же законы! Но вспомним, как строится физическая теория.

Если мы изучаем некий физический процесс (наблюдаем за ним, проводим эксперименты и расчеты), то не стараемся охватить все явления, которые наблюдаются в ходе этого процесса. Мы не учитываем влияние всех факторов, а выбираем только те, которые, по нашему мнению, существенно влияют на процесс, то есть строим *физическую модель* процесса. Использование модели позволяет объяснить природу еще целого ряда физических явлений, сформулировать законы, которым они подчиняются. Совокупность физических законов образует *физическую теорию*.

Поскольку для создания теории мы используем физическую модель, а наши знания ограничены известными на данное время фактами, то не удивительно, что со временем накапливаются новые факты, которые уже не будут укладываться в границы созданной нами теории. То есть наша теория имеет *границы применимости*. Новые факты ведут к созданию *новой теории*, которая обычно содержит предыдущую теорию как составляющую, а не противоречит ей (рис. 39.1, 39.2).

## 3 Фундаментальные взаимодействия



Вспомните курсы физики и химии. Благодаря какому взаимодействию удерживаются нуклоны в ядре? электроны в атоме? атомы в молекуле? молекулы в веществе? человек вблизи планеты? планета вблизи Солнца?

Надеемся, вы вспомнили три известных вам вида взаимодействия: *сильное, электромагнитное, гравитационное*. Именно взаимодействие обуславливает объединение «кирпичиков» материи в атомы, атомов — в молекулы, молекул — в вещество и т. д. Любые свойства тел, любые явления связаны со взаимодействием.



Сейчас в науке различают *четыре фундаментальных взаимодействия*: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое (см. таблицу).

Фундаментальные взаимодействия в природе			
гравитационное	электромагнитное	сильное	слабое
Любые материальные объекты во Вселенной притягиваются друг к другу	Электрическое взаимодействие заряженных тел и частиц; магнитное притяжение и отталкивание намагниченных тел и движущихся заряженных частиц	Взаимное притяжение нуклонов внутри ядра независимо от их заряда	«Отвечает» за $\beta$ -распад атомных ядер
Проявляется на любых расстояниях	Проявляется на любых расстояниях	Проявляется на расстояниях порядка $10^{-15}$ м (размер нуклона)	Проявляется на расстояниях порядка $10^{-18}$ м
Образование и существование планет, звездных планетных систем, галактик и т. д.	Образование и существование атомов, молекул, физических тел; излучение радиосигналов, передача нервных импульсов и т. д.	Существование и стойкость атомных ядер	Медленные распады частиц
		Свечение звезд	

Ученые пытаются создать теорию единого универсального взаимодействия, и некоторые шаги уже сделаны. В конце 60-х гг. прошлого столетия удалось создать теорию так называемого *электрослабого взаимодействия*, в границах которой объединены электромагнитное и слабое взаимодействия. Но до полного («большого») объединения всех видов взаимодействий еще далеко.

#### 4 Узнаём о фундаментальном характере законов сохранения

Пространство и время являются своеобразной ареной, на которой «разыгрываются» все явления и процессы во Вселенной. Поэтому неудивительно, что именно с фундаментальными свойствами пространства и времени связаны самые важные законы Вселенной — законы сохранения. Эти законы называют *фундаментальными*, ведь им подчиняются как объекты макромира, так и объекты микро- и мегамира, — эти законы выполняются при любом взаимодействии.

Длительное время ученые интуитивно догадывались, что каждый закон сохранения связан с определенной симметрией во Вселенной (рис. 39.3).

В 1918 г. выдающийся немецкий математик Амалия Эмми Нётер (1882–1935) доказала теорему, согласно которой *каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует определенный закон сохранения*. Так, закон сохранения энергии является следствием однородности времени\* —

\* Однородность пространства и времени означает, что физические свойства и явления одинаковы в любой точке пространства, в любой момент времени.



**Рис. 39.3.** Простейшие типы симметрий в природе

симметрии относительно сдвига во времени; закон сохранения импульса является следствием однородности пространства — симметрии относительно перенесения в пространстве.

Одно из следствий законов сохранения — предвидение невозможности некоторых процессов, ведь эти законы позволяют сделать обобщенные выводы даже без детальной информации. Например, мы знаем о невозможности создания вечного двигателя: сама идея его существования противоречит закону сохранения и превращения энергии.

Вы знаете три фундаментальных закона сохранения: *закон сохранения и превращения энергии, закон сохранения импульса, закон сохранения электрического заряда.*

## 5 Рассматриваем проявления закона сохранения и превращения энергии

Закон сохранения и превращения энергии постулирует, что *энергия никуда не исчезает, ниоткуда не возникает, она только передается от одного тела к другому, преобразуется из одного вида в другой.* Вспомним виды энергии и рассмотрим преобразования энергии на примерах.

Виды энергии в природе						
Механическая	Внутренняя			Электромагнитная		
	тепловая	химическая	ядерная	электрическая	магнитная	излучение
Энергия движения и взаимодействия тел или частей тела	Энергия хаотичного движения и взаимодействия частиц вещества	Энергия химических связей	Энергия, «скрытая» в ядрах атомов	Энергия электрического тока	Энергия постоянных магнитов и электромагнитов	Энергия электромагнитных волн

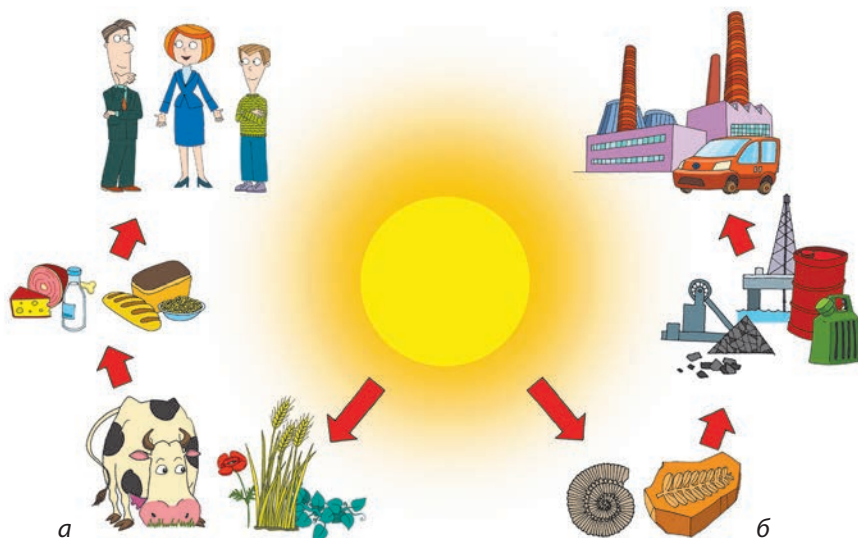
*Пример 1.* На рис. 39.4 представлены две цепочки преобразования солнечной энергии. Проследим за «природной» цепочкой (рис. 39.4, а).

*Ядерная энергия*, которая высвобождается на Солнце при термоядерной реакции, преобразуется в *энергию излучения*. Попадая на зеленые листья растений, эта энергия поглощается хлорофиллом и преобразуется в *химическую энергию питательных веществ*.

Потребляя химическую энергию, сохраненную растениями (пищу), организм человека преобразует ее в *химическую энергию клеток*.

Химическая энергия, запасенная, например, в мышцах человека, преобразуется в *механическую энергию* (кинетическую энергию движения).

**?** Опишите цепочку преобразований солнечной энергии по рис. 39.4, б.



**Рис. 39.4.** Преобразования солнечной энергии в природе (а); технике (б)

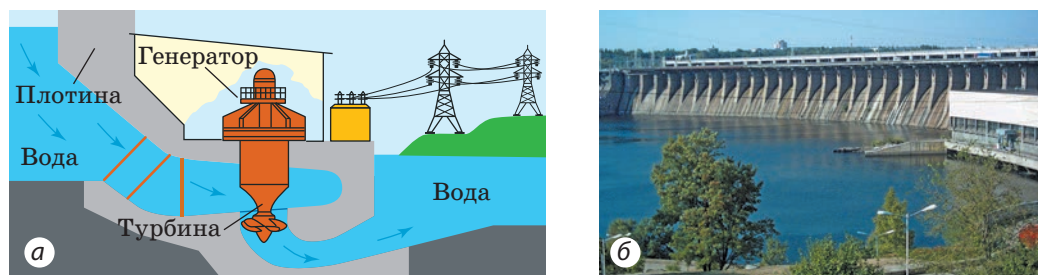
**Пример 2.** Рассмотрим «движение» энергии во время работы гидроэлектростанции (рис. 39.5).

Плотина перегородила реку — образовалось водохранилище, уровень воды в котором выше, чем за плотиной, поэтому вода в водохранилище имеет потенциальную энергию. Падая с высоты, вода теряет потенциальную энергию, но приобретает кинетическую.

Попадая на лопасти турбины, вода отдает ей свою кинетическую энергию, и турбина приобретает кинетическую энергию вращения.

Турбина вращает ротор электрического генератора, в котором механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию.

По проводам электрическая энергия доходит до электролампы в вашем жилье и в ней преобразуется в световую и тепловую энергии.



**Рис. 39.5.** Гидроэлектростанция: а — схема работы; б — вид (Днепрогэс)

Во время каждого из процессов часть энергии преобразуется во внутреннюю (нагрев воды, подшипников турбины и генератора, проводов и т. д.).

В каждой из приведенных цепочек энергия преобразуется из одного вида в другой, но *общее количество энергии остается неизменным* (энергия сохраняется). Если на любом этапе преобразований найти сумму всех значений разных видов энергий, эта сумма всегда будет одинакова.



### Подводим итоги

Всю доступную для наблюдения часть материального мира называют Вселенной. Все объекты Вселенной и присущие им явления наука разделяет на три качественно разных уровня: микромир, макромир и мегамир.

Все физические явления и существование объектов Вселенной можно объяснить на основе фундаментальных видов взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного, слабого.

Вселенная существует в пространстве и времени, свойствами которых объясняется существование фундаментальных законов сохранения, — законов, которым подчиняются все процессы любого структурного уровня Вселенной. К таким законам относятся, например, закон сохранения и превращения энергии и закон сохранения импульса.

Каждая физическая теория имеет границы применения. С появлением новых знаний создается новая теория, которая обычно содержит предыдущую теорию как составляющую.



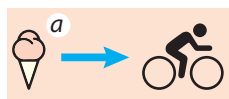
### Контрольные вопросы

1. Назовите структурные уровни Вселенной. Какая теория преимущественно описывает каждый из этих уровней?
2. Почему любая физическая теория имеет границы применимости?
3. Какие фундаментальные взаимодействия вы знаете? Приведите примеры их проявлений.
4. Какие виды энергии вы знаете?
5. Приведите примеры проявления закона сохранения и превращения энергии.



### Упражнение № 39

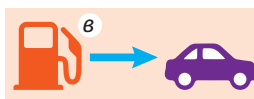
1. Среди полезных хозяйственных советов есть такой: чтобы картофель, хранящийся зимой на балконе, не подмерз, в ящике для хранения нужно разместить электрическую лампу накаливания и периодически ее включать. Зачем? Разве в темноте холоднее, чем при свете?
2. На рис. 1 представлено несколько примеров преобразования энергии. Какой вид энергии и в какой преобразуется в каждом случае?
3. Какие преобразования энергии происходят при запуске на орбиту космического корабля? при подъеме лифта? забивании гвоздя в доску?
4. Воспользовавшись данными рис. 2, определите КПД автомобиля.



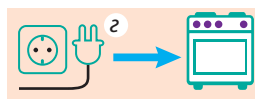
Пища дает энергию для движения человека



Солнце дает энергию растению



Топливо дает энергию автомобилю



Включенная электроплита нагревается

Рис. 1

5. При объединении двух частиц возникла более сложная частица и выделилась некоторая энергия  $E$  (рис. 3, а). Затем частицу разделили, восстановив начальное состояние (рис. 3, б). Выделилась или поглотилась при этом энергия? Сколько энергии выделилось или поглотилось?
6. Воспользовавшись радиоактивным рядом Тория (см. рис. 23.9), запишите одну реакцию  $\beta$ -распада и одну реакцию  $\alpha$ -распада. Докажите, что во время этих реакций выполняется закон сохранения электрического заряда.

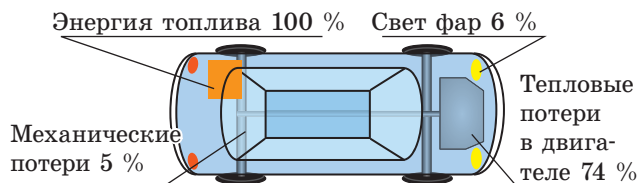


Рис. 2

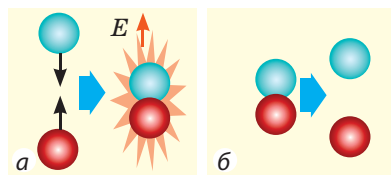


Рис. 3



### Экспериментальное задание

Используя гимнастический обруч, веревку, линейку и секундомер, докажете справедливость закона сохранения механической энергии.

1. Измерьте длину обруча и подвесьте его так, чтобы точки подвеса были в вершинах правильного треугольника (рис. 4).
2. Закрутите обруч так, чтобы веревка в верхней части была туго скручена.
3. Измерьте высоту  $h$ , на которую при этом поднялся обруч.
4. Отпустите обруч — он начнет вращаться. Когда скорость вращения обруча будет приближаться к максимальной (веревка почти полностью раскрутится), определите скорость движения точек обруча. Для этого измерьте время пяти полных оборотов, вычислите период вращения  $T$  и воспользуйтесь формулой  $v = l/T$ , где  $l$  — длина обруча.
5. Найдите отношение потенциальной энергии поднятого обруча к кинетической энергии движения его точек. Сделайте вывод.



Рис. 4

### Физика и техника в Украине



**Виктор Михайлович Глушков** (1923–1982) — всемирно известный украинский советский ученый, академик, автор фундаментальных работ в области кибернетики, математики и вычислительной техники, основатель и первый директор Института кибернетики НАНУ (Киев), который сегодня носит его имя.

Первые разработки Института кибернетики — ЭВМ «Киев» и универсальная управляющая машина «Днепр», которая была достойным конкурентом лучшим зарубежным аналогам. Первой машиной для инженерных расчетов стала ЭВМ «Луч» со ступенчатым микропрограммным управлением, следующими — уникальные вычислительные системы «МИР-1», «МИР-2», «МИР-3». Со временем идеи Глушкова были реализованы его учениками при создании самых быстродействующих на то время систем ЕС-2701 и ЕС-1766 с номинальной производительностью свыше 1 млрд операций в секунду.

По инициативе В. М. Глушкова в 1969 г. на базе Киевского университета им. Тараса Шевченко был открыт факультет кибернетики.

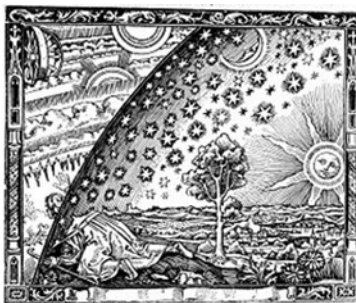
В 1982 г. Академия наук УССР учредила премию им. В. Г. Глушкова за выдающиеся научные работы в области кибернетики, общей теории вычислительных машин и систем.



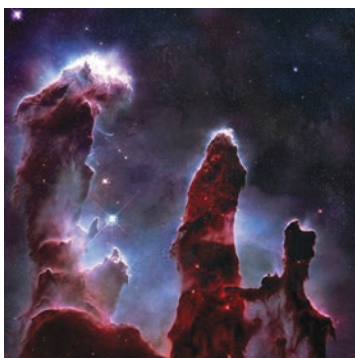
## § 40. ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА. ФИЗИКА И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Вы изучаете физику три года и уже ознакомились с основными разделами этой науки — механикой, оптикой, электричеством и др. Вы узнали о том, что в физике называют законами; выяснили, как исследуют физические явления, каким образом достижения ученых-физиков воплощаются в приборах, машинах, оборудовании, значительно повышая качество жизни человека. Теперь рассмотрим вопрос эволюции физической картины мира и взаимосвязи физики и общественного развития.

### 1 Узнаём об эволюции физической картины мира



**Рис. 40.1.** Древние представления о строении мира (гравюра)



**Рис. 40.2.** С помощью космического телескопа удалось сфотографировать Туманность Орла — скопление звезд, расположенное на расстоянии 7000 световых лет от Земли

На протяжении тысячелетий человека интересовали вопросы: что представляет собой окружающая Вселенная? как она «устроена»? по каким законами развивается?

Древние философы считали Землю центром Вселенной и полагали, что Земля плоская и окружена гигантской хрустальной сферой (рис. 40.1).

В Средние века благодаря учениям *Галилео Галилея* и *Николая Коперника* была сформирована *гелиоцентрическая картина мира* — учение, согласно которому Солнце находится в центре Вселенной, а все тела, в том числе планеты, и в частности Земля, вращаются вокруг Солнца.

За последние 100 лет знания человечества о Вселенной значительно углубились. *Общая теория относительности Альберта Эйнштейна* объяснила существование многих загадочных объектов Вселенной, например черных дыр. Благодаря радиотелескопам, работающим во многих диапазонах электромагнитных волн, расширились возможности получения информации о космическом пространстве.

Космические аппараты пролетели вблизи всех планет Солнечной системы, сфотографировали их поверхности, побывали на Марсе, Венере, Луне, других небесных телах. С 1990 г. на орбите Земли работает телескоп «Хаббл», благодаря которому удалось «увидеть» объекты в далеких галактиках (рис. 40.2).

Параллельно с изучением объектов мега- и макромира ученые исследовали мир молекул, атомов и их составных частей — микромир.

Первоначальные представления об атомах возникли примерно 2,5 тысячи лет назад. Они были умозрительны и основывались только на логических построениях философов Древней Греции. В XIX в. появились косвенные доказательства атомарного строения материи, которые базировались, в частности, на уникальных (но непрямых) экспериментах (рис. 40.3).

Только в конце XIX — начале XX в. появились неопровержимые доказательства *атомно-ядерной структуры материи* (рис. 40.4). С помощью новейших сверхчувствительных микроскопов, созданных в конце прошлого века (туннельный, автоэлектронный, автоионный, электронный) (рис. 40.5), удалось сфотографировать отдельные атомы.

## 2 Знакомимся с развитием представлений о природе света

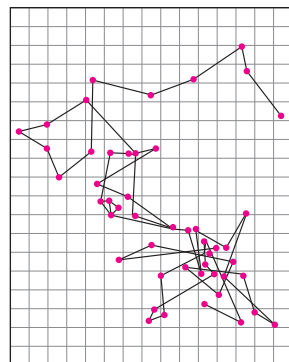
Со времен древнегреческого философа Аристотеля и до наших дней физическая наука стремится создать целостную картину мира. Исследователи всегда пытались найти единую теорию, которая описывала бы и мега-, и макро-, и микромир.

Первое «соединительное звено» появилось на рубеже XVII–XVIII вв. при изучении природы света. Почти одновременно два выдающихся физика создали две абсолютно разных теории света. Речь идет о корпускулярной теории *И. Ньютона* и волновой теории *Х. Гюйгенса*.

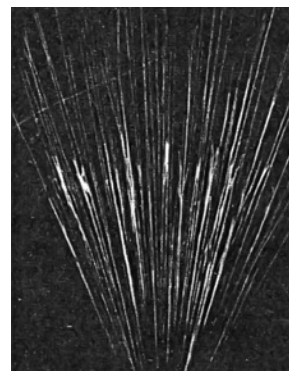
Согласно *корпускулярной теории Ньютона свет — это поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами*, причем движение световых корпускул подчиняется законам механики. Так, отражение света Ньютон объяснял отражением корпускул от поверхности, на которую падает свет, а преломление света — изменением скорости движения корпускул в результате их взаимодействия с частицами среды.

«Трактат о свете» Гюйгенса, опубликованный в 1690 г., вошел в историю науки как первая научная работа по *волновой оптике*.

Волновую теорию света поддерживали такие выдающиеся ученые, как *М. В. Ломоносов* (1711–1765) и *Л. Эйлер* (1707–1783), однако до конца XVIII — начала XIX в. общепризнанной оставалась корпускулярная теория Ньютона. Так было до тех пор, пока не появились работы английского физика *Томаса Юнга* (1773–1829) и французского физика



**Рис. 40.3.** Копия рисунка французского физика Жана Батиста Перрена (1870–1942), на котором воспроизведены результаты наблюдения в микроскоп броуновской частицы — мельчайшей частицы вещества, зависшей в жидкости. Броуновское движение частиц, вызванное хаотичными ударами по ним молекул, подтверждает атомарное строение материи



**Рис. 40.4.** Следы  $\alpha$ -частиц в камере Вильсона — устройстве для регистрации заряженных частиц



**Рис. 40.5.** Электронный микроскоп

*Огюстена Жана Френеля (1788–1827).* Исследуя свет, ученые наблюдали явления, свойственные только волнам: огибание светом препятствий (дифракция), усиление и ослабление света при наложении световых пучков (интерференция). С того времени в науке стала преобладать **волновая теория Гюйгенса**.

В 60-х годах XIX в. *Дж. Максвелл* создал теорию электромагнитного поля, одним из следствий которой было установление возможности существования электромагнитных волн. По расчетам выходило, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. На основе теоретических исследований Максвелл пришел к выводу, что *свет — это электромагнитные волны*. После опытов *Г. Герца* никаких сомнений в *электромагнитной природе света* не осталось.

Электромагнитная теория света позволила объяснить многие оптические явления, но уже к концу XIX в. стало понятно, что этой теории недостаточно для объяснения явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом. Так, процессы излучения и поглощения света, явление фотоэффекта и др. смогли объяснить только в первой половине XX в. — с позиций **квантовой теории света**, согласно которой свет излучается, распространяется и поглощается веществом не непрерывно, а конечными порциями — *квантами*. Каждый отдельный квант света имеет свойства частицы, а совокупность квантов ведет себя как волна. Такая двойственная природа света (да и любой частицы) получила название **корпускулярно-волновой дуализм**.

Таким образом, через несколько сотен лет две абсолютно разные теории «объединились». Параллельно появлялись и другие «соединительные звенья». Когда ученые начали изучать физические процессы, происходящие в звездах, оказалось, что «свечение» этих гигантских скоплений связано со структурой и свойствами наименьших из известных к тому времени объектов — атомных ядер. Так что гигантские ускорители, созданные для изучения микроструктуры материи, дали ответ не только на вопрос «Какова структура атомного ядра?», но и на другой: «Почему светит Солнце?».

Ученые уверены: еще больше загадок Вселенной будет разгадано после получения данных о свойствах элементарных частиц. С этой целью был создан мощнейший из ускорителей — *большой адронный коллайдер* (см. [рис. 22.1](#)). Он был запущен в 2008 г. усилиями ученых многих стран.

### 3

## Подытоживаем роль физики в научно-техническом прогрессе

*Научно-технический прогресс* — это единое, взаимообусловленное, поступательное развитие науки и техники.

В курсе физики 9 класса, как и ранее, мы не раз обращали ваше внимание на тесную связь между физикой и техникой. Физическая наука

существует почти 25 веков, и результаты ее исследований были направлены не только на объяснение природы мироздания — ученые-физики всегда стремились научно обосновать применение различных технических устройств и приемов.

В XIX в. появилась новая тенденция: физические законы стали применять не только для объяснения и улучшения уже изобретенных инженерами конструкций — они стали «пищей для ума» в процессе создания новых направлений в технике. Приведем несколько примеров.

До XIX в. электричество служило в основном для салонных развлечений (рис. 40.6). Примерно в середине XIX в. благодаря установлению физических законов, описывающих возникновение, прохождение и действие электрического тока (закона Ома, закона электромагнитной индукции и др.), начинает развиваться телеграфная связь, а затем и телефонная. Изобретение и широкое распространение радио стали возможны после создания *теории электромагнитного поля Максвелла*.

В XIX в. установление новых физических законов происходило, как правило, случайно. Соответственно появление технических изобретений, связанных с этими законами, тоже было спонтанным, и только в XX в. этот процесс был несколько упорядочен. Целый ряд проектов (самый известный из них — «Урановый проект» — программа работ по созданию атомного оружия) осуществлялся по прямому заказу правительств стран. В рамках каждого проекта проводились научные исследования, по результатам которых выполнялись инженерные разработки (расчеты, изготовление конструкций).

Современный этап развития физики характеризуется ее тесной связью с производством и бизнесом. Для решения новой технической задачи привлекают не только инженеров, технологов, но и ученых. Пример результата такого сотрудничества — миниатюризация мобильных телефонов.

Физика повлияла и на развитие других наук. Прежде всего это связано с пониманием структуры материи, основанном на описании микромира с помощью квантовой механики. Так, применение квантовой механики позволило за короткий срок достичь существенного прогресса в развитии химии и биологии.

Практически все современные измерительные приборы и методы измерения, применяемые в астрономии, медицине, археологии и т. д., «выросли» из соответствующих законов физики.



**Рис. 40.6.** Опыт, демонстрирующий существование проводников и диэлектриков (гравюра середины XVIII в.). Женщина сидит на качелях, подвешенных на шелковых нитях. Мужчина, стоящий справа, приближает наэлектризованную стеклянную палочку к руке женщины, а стоящий слева прикасается к ее другой руке — появляется искра





### Подводим итоги

Почти за 2500 лет своего существования физика смогла создать целостное представление о природе, объединяющее знания о мега-, макро- и микромире. Значительные усилия ученых-физиков были направлены также на практическое воплощение результатов своих исследований.

Начиная с XIX в. физики не только объясняют известные факты. Они устанавливают новые законы и, опираясь на них, развивают новые области техники.

Особенность современной физической науки — «заказы на разработку»: научные исследования в основном осуществляются для решения конкретных практических задач.

Результаты, полученные учеными-физиками, используются в других науках, в частности в биологии и химии. Физические приборы и методы исследований широко применяют в науке, промышленности, сельском хозяйстве.



### Контрольные вопросы

**1.** С помощью каких приборов изучают мегамир? **2.** Какие методы и приборы используют физики для изучения свойств атомов? **3.** Каковы современные представления о природе света? **4.** В чем сущность корпускулярно-волнового дуализма? **5.** Приведите доказательства того, что знание закона Ома необходимо для инженеров.

### Физика и техника в Украине



**Борис Иеремиевич Веркин** (1919–1990) — выдающийся украинский советский ученый в области физики низких температур, основатель и первый директор *Физико-технического института низких температур АН УССР* (г. Харьков).

Научные работы Б. И. Веркина посвящены исследованию природы магнитных свойств металлов, фундаментальной и прикладной сверхпроводимости, структуре материалов при низких температурах, свойствам криогенных кристаллов и жидкостей, молекулярной биофизике, поведению жидкости в условиях невесомости. Значителен вклад ученого в исследования космоса: при участии Б. И. Веркина был создан комплекс приборов, установленных на космических аппаратах «Венера-9», «Венера-10», «Салют-4» для имитации физических условий Луны, Марса и других планет.

В области криогенной медицины Б. И. Веркин разработал методы продолжительной низкотемпературной консервации клеток крови, тканей и костного мозга, а также криохирургические инструменты и аппараты для применения в дерматологии, гинекологии, стоматологии, нейрохирургии и других отраслях медицины.

Физико-техническому институту низких температур присвоено имя Б. И. Веркина. НАНУ основала премию им. Б. И. Веркина за выдающиеся научные работы в области физики и техники низких температур.



## Освоение космоса

### Первые шаги в космос

4 октября 1957 г. советские ученые вывели на околоземную орбиту первый искусственный спутник Земли, и это стало началом космической эры в истории человечества (рис. 1). После отделения спутника от ракеты-носителя радиопередатчик начал передавать первый искусственный сигнал из космоса — и этот сигнал слышал весь мир.



Рис. 1



Рис. 2

12 апреля 1961 г. человек впервые полетел в космос. Этот полет осуществил на космическом корабле «Восток» советский космонавт Юрий Алексеевич Гагарин (1934–1968) (на рис. 2 слева). «Восток» был разработан выдающимся конструктором Сергеем Павловичем Королевым (1907–1966) (на рис. 2 справа), уроженцем г. Житомира, выпускником Киевского политехнического института.

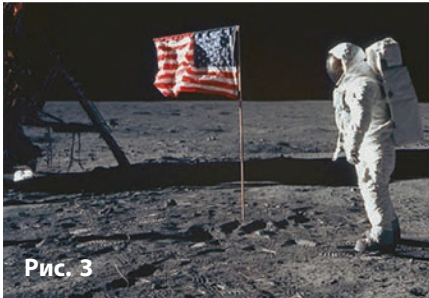
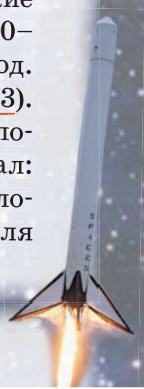


Рис. 3

21 июля 1969 г. американские астронавты Нил Армстронг (1930–2012) и Базз (Эдвин) Олдрин (род. 1930) высадились на Луне (рис. 3). Сделав первый шаг по лунной поверхности, Н. Армстронг сказал: «Это маленький шаг для одного человека, однако огромный прыжок для всего человечества».



### Проект «Розетта»

Идея проекта заключалась в том, чтобы посадить космический аппарат на комету. Космический зонд «Розетта», созданный специалистами Европейского космического агентства, был запущен в 2004 г. За десять лет он преодолел сотни миллионов километров и вышел на орбиту кометы размером менее 10 км (!). С «Розетты» был спущен аппарат «Филы», который 12 ноября 2014 г. совершил успешную посадку на поверхность кометы (рис. 4). Остается добавить, что «Розетта» исследовала комету Чурюмова — Герасименко, открытую в 1969 г. ученым из Украины Климом Ивановичем Чурюмовым (1937–2016).



Рис. 4

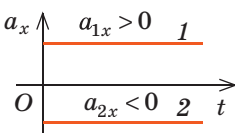
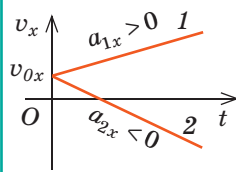
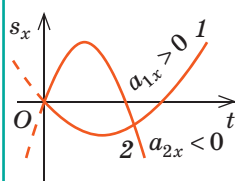
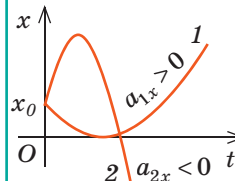
## ПОДВОДИМ ИТОГИ РАЗДЕЛА V «Движение и взаимодействие. Законы сохранения»

- Изучая раздел V, вы вспомнили *основные понятия механики* (механическое движение, траектория, путь, перемещение, система отсчета), узнали о *равноускоренном прямолинейном движении*, научились определять *физические величины*, характеризующие это движение.

### РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

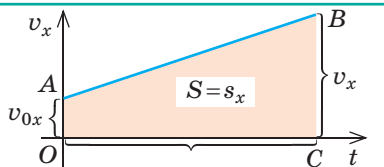
движение, при котором тело движется по прямолинейной траектории с неизменным по модулю и направлению ускорением

#### Физические величины

Ускорение [a] = 1 м/с <sup>2</sup>	Скорость движения [v] = 1 м/с	Перемещение [s] = 1 м	Координата [x] = 1 м
$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$ 	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ 	$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ 	$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$ 

Геометрический смысл перемещения:

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



- Вы изучили важнейшие законы динамики — *законы Ньютона*, научились различать *инерциальные и неинерциальные системы отсчета*.

### РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Первый закон Ньютона	Второй закон Ньютона	Третий закон Ньютона
Существуют такие системы отсчета ( <i>инерциальные</i> ), относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют никакие силы или если эти силы скомпенсированы	Ускорение, которое приобретает тело в результате действия силы, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе тела: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$	Тела взаимодействуют друг с другом с силами, которые направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

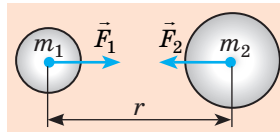
3. Вы углубили свои знания о *гравитационном взаимодействии*, изучили *закон всемирного тяготения* и получили *формулу для определения силы тяжести*.

### ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ

#### Сила всемирного тяготения

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

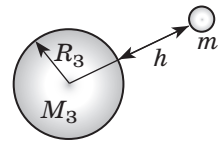
$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$



#### Сила тяжести

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

$$F = mg$$



4. Вы выяснили, что движение тела только под действием силы тяжести называют *свободным падением*, а ускорение, с которым движутся тела под действием силы тяжести, — *ускорением свободного падения*.

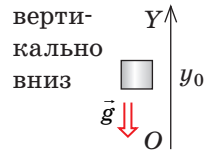
### УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

#### Формула

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

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  —  
вблизи поверхности Земли

#### Направление



#### Зависит

- от высоты расположения тела над поверхностью Земли;
- от географической широты местности

#### Не зависит

- от массы тела;
- от значения и направления скорости движения тела

5. Вы вспомнили *закон сохранения механической энергии*, ознакомились с *законом сохранения импульса*.

### ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

#### Закон сохранения механической энергии

В замкнутой системе тел, которые взаимодействуют только силами упругости и силами тяготения, полная механическая энергия сохраняется:

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$$

#### Закон сохранения импульса

В замкнутой системе тел векторная сумма импульсов тел остается неизменной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$$

6. Вы обобщили свои знания о *фундаментальных взаимодействиях в природе*, узнали о *фундаментальном характере законов сохранения*.

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Гравитационное

Электромагнитное

Сильное

Слабое

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ К РАЗДЕЛУ V «Движение и взаимодействие. Законы сохранения»

Задания 1–7 содержат только один правильный ответ.

- (1 балл) Тело движется вдоль оси  $OX$ . На рис. 1 приведен график зависимости проекции скорости движения этого тела от времени наблюдения. Какой участок графика соответствует равномерному движению тела?  
а) участок  $AB$ ;    в) участок  $CD$ ;  
б) участок  $BC$ ;    г) участки  $AB$  и  $CD$ .
- (1 балл) Какая из представленных физических величин является скалярной?  
а) ускорение;    б) скорость движения;    в) импульс;    г) энергия.
- (1 балл) С каким телом следует связать систему отсчета, чтобы она была инерциальной?  
а) с поездом, набирающим скорость;  
б) с девочкой, качающейся на качелях;  
в) с мальчиком, идущим по дороге прямолинейно с неизменной скоростью;  
г) с собакой, замедляющей свое движение.
- (1 балл) Тело, брошенное вертикально вверх, движется только под действием силы тяжести. Ускорение движения тела:  
а) наибольшее в момент начала движения;  
б) одинаково в любой момент движения;  
в) наименьшее в высшей точке траектории;  
г) увеличивается во время падения.
- (2 балла) С каким ускорением движется тело, если в течение 2 с скорость его движения увеличивается от 3 до 6 м/с?  
а) 1,5 м/с<sup>2</sup>;    б) 3 м/с<sup>2</sup>;    в) 4,5 м/с<sup>2</sup>;    г) 6 м/с<sup>2</sup>.
- (2 балла) Автомобиль начинает движение и в течение 5 с движется с неизменным ускорением 4 м/с<sup>2</sup>. Определите перемещение автомобиля за это время.  
а) 10 м;    б) 20 м;    в) 50 м;    г) 100 м.
- (2 балла) На рис. 2 изображены случаи взаимодействия двух тел. В каком случае систему тел нельзя считать замкнутой?

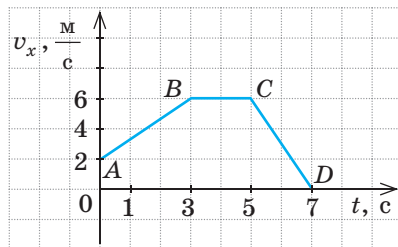


Рис. 1

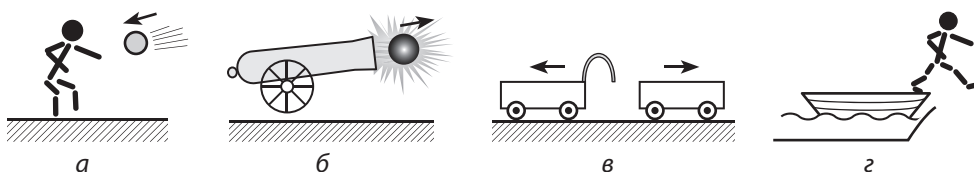


Рис. 2



8. (3 балла) Тело массой 100 г движется под действием двух взаимно перпендикулярных сил значениями 6 и 8 Н. Найдите ускорение тела.
9. (3 балла) По графику на рис. 1 определите перемещение тела за все время наблюдения. Считайте, что в выбранной системе отсчета тело двигалось вдоль оси  $OX$ .
10. (3 балла) Тело бросили вертикально вверх со скоростью 30 м/с. Через какой интервал времени тело окажется на расстоянии 25 м от места броска? Какой будет скорость движения тела через этот интервал времени?
11. (3 балла) На полу лифта стоит чемодан массой 20 кг. Лифт приходит в движение с ускорением 2 м/с<sup>2</sup>. Чему равен вес чемодана? Рассмотрите два варианта.
12. (4 балла) Тело массой 2,5 кг движется вдоль оси  $OX$ . Уравнение движения тела имеет вид:  $x = 15 + 3t - t^2$ . Установите для данного случая соответствие между каждой физической величиной и ее значением в СИ.
- |   |       |
|---|-------|
| 1 Сила, действующая на тело                                     | А 0   |
| 2 Импульс тела на начало наблюдения                             | Б 1,5 |
| 3 Кинетическая энергия тела через 1,5 с после начала наблюдения | В 4,5 |
| 4 Время движения тела до остановки                              | Г 5   |
|   | Д 7,5 |
13. (4 балла) Брусок массой 500 г под действием подвешенного к нему груза массой 150 г начал движение и за 2 с переместился на 80 см (рис. 3). Определите коэффициент трения скольжения.
14. (4 балла) Из точки, расположенной на высоте 2,8 м над поверхностью земли, вертикально вверх бросили тело 1 со скоростью 12 м/с. В момент, когда тело 1 достигло наивысшей точки подъема, с поверхности земли со скоростью 10 м/с бросили вверх тело 2. Определите высоту, на которой встретились тела, и время их встречи.
15. (4 балла) Воспользовавшись данными рис. 4, определите высоту  $h$ , на которую поднимутся два тела одинаковой массы после столкновения. Внутреннюю поверхность цилиндра считайте идеально гладкой.

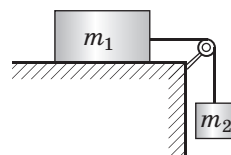


Рис. 3

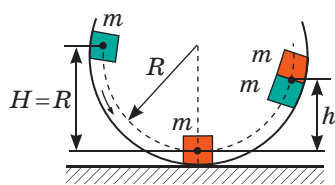


Рис. 4

Сверьте ваши ответы с приведенными в конце учебника. Отметьте задания, которые вы выполнили правильно, и подсчитайте сумму баллов. Затем эту сумму разделите на три. Полученное число будет соответствовать уровню ваших учебных достижений.



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



## Ориентировочные темы проектов

1. Законы сохранения в природе, технике, быту.
2. Физика в жизни современного человека.
3. Современное состояние физических исследований в Украине и мире.
4. Украина — космическая держава.
5. Применение закона сохранения импульса в технике.

## Темы рефератов и сообщений

1. Роль законов Ньютона в развитии физики.
2. Сила тяжести на планетах Солнечной системы и их спутниках.
3. Существует ли центробежная сила.
4. Как движется тело, брошенное под углом к горизонту, если сопротивлением воздуха пренебречь нельзя.
5. Реактивное движение в природе.
6. История космонавтики.
7. Первый украинский космонавт.
8. Жизненный путь и научная деятельность С. П. Королева.
9. Международный космический проект «Галилео».
10. Законы сохранения во Вселенной.
11. Энергия физического вакуума.
12. Почему массу называют мерой энергии.

## Темы экспериментальных исследований

1. Экспериментальная проверка второго закона Ньютона.
2. Экспериментальная проверка третьего закона Ньютона.
3. Изучение условия равномерного прямолинейного движения тела под действием нескольких сил.
4. Сложение сил.
5. Изучение дальности полета тела.
6. Создание и наблюдение реактивного движения.
7. Исследование упругого и неупругого ударов.
8. Изготовление приборов, действие которых основано на законе сохранения энергии.

## ФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Представьте, что вы на неделю остались без всех современных достижений цивилизации. Вы не можете общаться со своими друзьями по телефону и в Интернете, ваша квартира не отапливается, не подается электричество, вы не можете воспользоваться транспортом...

Возможность пользоваться достижениями, которые дали нам физика и техника, — это бесспорный плюс. Но, к сожалению, есть и минус. Быстрое развитие техники, которая требует все больше и больше энергии, истощение запасов полезных ископаемых, повсеместное использование синтетических материалов, строительство сооружений и магистралей из железобетона и др., — все это приводит к значительному ухудшению экологической ситуации. Физика и проблемы экологии — тема последнего в этом учебном году урока.

### 1 Узнаём о разных типах и видах загрязнения окружающей среды

Существуют два типа загрязнений: *естественные* и *антропогенные*.

? Попробуйте привести 2–3 примера каждого типа загрязнений.

В каждом из указанных типов можно выделить такие виды загрязнений: *химическое, биологическое, механическое* (рис. 1, 2), *физическое загрязнение*. Понятно, что негативное влияние веществ-загрязнителей и излучений зависит от их концентрации, стойкости (времени их существования), химической и радиационной активности.

Мы остановимся на *антропогенном физическом загрязнении окружающей среды*, а именно на *тепловом, шумовом, радиоактивном и электромагнитном загрязнениях*. Заметим, что мы уже обращали на них внимание при изучении соответствующих тем.

### 2 Вспоминаем о тепловом загрязнении

Тепловое загрязнение прежде всего связано с *парниковым эффектом*. Для работы промышленности, транспорта, получения электрической энергии, отопления помещений человечество сжигает огромное количество угля, нефти и газа. При этом в атмосферу выбрасывается углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), который становится своеобразным зеркалом, отражающим тепловое излучение, идущее от Земли. В результате часть энергии задерживается



**Рис. 1.** Мусор, попадая в океан, приводит к уничтожению естественного планктона, который вырабатывает до 50 % кислорода, содержащегося в атмосфере Земли



**Рис. 2.** Смог (дым, пыль, туман), образующийся в крупных городах, увеличивает количество осадков, препятствует проникновению солнечных лучей, приводит к отравлению человека изнутри



**Рис. 3.** По данным спутниковых радаров, каждые 10 лет высота шельфовых ледников в морях Беллинсгаузена и Амундсена (Антарктида) уменьшается в среднем на 740–1920 см



**Рис. 4.** Сине-зеленые водоросли, разрастаясь в теплой воде, активно поглощают кислород



**Рис. 5.** Измерение уровня шума от глушителя автомобиля

в атмосфере и увеличивает ее температуру. Из-за парникового эффекта средняя температура поверхности Земли повысилась на  $0,7^{\circ}\text{C}$ . Такое нагревание стало причиной глобальных изменений климата, сопровождающихся ливнями и засухами. С глобальным потеплением связано таяние ледников в Арктике и Антарктике (рис. 3), повышение уровня Мирового океана и т. д.

Источниками теплового загрязнения являются также теплотрассы, подземные газопроводы, теплоэлектростанции, использующие для слива горячей воды водоемы. Нагревание водоемов, в свою очередь, приводит к уменьшению в них растворенного кислорода (ведь с увеличением температуры растворимость газов уменьшается), что служит причиной роста сине-зеленых водорослей (рис. 4), которые тоже поглощают кислород.



А вот на вопрос «К чему приводит недостаток кислорода в водоеме?» попробуйте ответить самостоятельно.

### 3

#### Боремся с шумовым загрязнением

Шум в 20–30 децибел (дБ) практически безвреден для человека. А вот шум большей мощности приводит к ухудшению слуха, увеличивает кровяное давление, негативно влияет на сердечно-сосудистую систему, может вызвать нервные и психические расстройства.

Самым мощным и распространенным источником шума является транспорт, на который приходится 60–80 % всех шумов в местах пребывания людей. Уровень шума, создаваемый автомобильным транспортом, может составлять 75–85 дБ, железнодорожным и авиационным — свыше 100 дБ.

Учитывая, что для человека не является вредным шум только в 20–30 дБ, можно понять, насколько негативное воздействие испытывают люди, живущие, например, вблизи больших магистралей, железных дорог, аэропортов.

Таким образом, борьба с транспортным шумом (см. рис. 5, 6) имеет важное значение и осуществляется в нескольких направлениях: создание малошумных транспортных средств,

улучшение покрытия дорог, продуманное расположение и оборудование магистралей (кольцевые дороги, объезды, зеленые насаждения, шумозащитные экраны), организационные меры (запрет полетов самолетов над большими городами, обязательное наличие глушителей, запрет звуковых сигналов и т. п.).



**Рис. 6.** Шумозащитные экраны, установленные около трасс, уменьшают уровень шума в несколько раз

**?** Какие еще источники шума, кроме транспорта, вы знаете? Как можно защитить себя от этого шума?

**4**

### Вспоминаем о радиационном и электромагнитном загрязнении

Из раздела III вы узнали об *электромагнитном загрязнении*, из раздела IV — о *радиационном*. Вспомним основные источники этих загрязнений, последствия негативного влияния радиоактивного и электромагнитного излучений на человека, выясним, как избежать этих последствий.

	Радиационное загрязнение	Электромагнитное загрязнение
Источники загрязнения	Аварии на атомных электростанциях. Рентгеновские и $\gamma$ -исследования. Лечение $\gamma$ -излучением (химиотерапия). Терригенное (земное) излучение (щебень, керамзит, гранит; радон, выходящий из недр Земли и скапливающийся в подвалах)	Высоковольтные линии электропередач. Теле- и радиостанции. Мобильные телефоны. СВЧ-печи. Электростанции. Трансформаторные станции. Компьютеры
Негативное воздействие	Разрушает клетки организма. Влияет на наследственность. Повреждает молекулы ДНК, что приводит к злокачественным опухолям. Служит причиной лучевой болезни	Увеличивает утомляемость. Служит причиной нервных нарушений. Увеличивает вероятность бесплодия. Может привести к опухоли мозга. Снижает иммунитет
Средства борьбы	Проходить рентгеновское исследование не чаще одного раза в год. Не находиться в зоне радиационного загрязнения. Регулярно проветривать помещение. Меньше времени находиться в закрытых помещениях, вблизи гранитных дорог	Уменьшить время использования беспроводных сетей. Использовать преимущественно проводную связь. Не держать мобильный телефон вблизи головы (использовать наушники). Не носить мобильный телефон в кармане

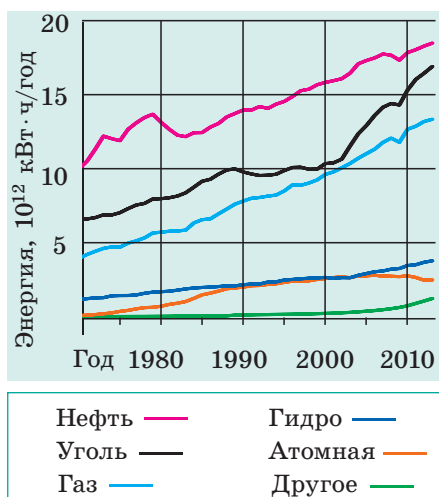


Рис. 7. Мировое потребление энергии



Рис. 8. АЭС «Палюэль» — крупнейшая атомная электростанция Франции



Рис. 9. Полупроводниковые солнечные панели, установленные на частной территории

## 5 Узнаём об альтернативных источниках энергии

На протяжении многих веков углеводородное топливо (дрова, уголь, торф, газ, нефть) было практически единственным источником энергии для человечества, причем оно почти не наносило ущерба окружающей среде. Но за последнее столетие резко увеличилось использование тепловых машин, преобразующих энергию топлива в механическую и электрическую энергию. Это привело, во-первых, к истощению ископаемых ресурсов, во-вторых, к глобальному изменению климата Земли. Человечество пока не может снизить количество потребляемой энергии, — наоборот, это количество неуклонно растет, и большая часть энергии по-прежнему производится за счет сжигания быстро исчерпывающихся углеводородных видов топлива (рис. 7).

Современное развитие техники позволяет использовать **альтернативные источники энергии**, а именно *ядерную энергию, энергии ветра и Солнца, энергию приливов и отливов, геотермальную энергию Земли*. Приведем несколько примеров.

*Атомная энергетика* Франции имеет наибольший уровень использования атомной энергии в Европе: 78 % электроэнергии, производимой в стране, дают именно атомные электростанции (рис. 8).

Во многих странах начинает развиваться *солнечная энергетика*. На энергии Солнца работают и огромные электростанции, и небольшие солнечные панели, обслуживающие частные дома. Используют два способа преобразования солнечной энергии в электрическую: прямое преобразование с помощью полупроводниковых устройств (рис. 9) и преобразование солнечной энергии сначала в тепловую, а затем в электрическую (рис. 10).

Еще один возобновляемый источник энергии — ветер. *Ветроэнергетика* развивается очень быстро: хотя сейчас



ветрогенераторы вырабатывают всего лишь 1 % электроэнергии в мире, есть страны, в которых доля ветроэнергетики довольно высока. Так, 42 % электроэнергии Дании производится с использованием *энергии ветра* (рис. 11).

Мощный и практически неисчерпаемый источник энергии — *энергия приливов и отливов*. Первая приливная электростанция была построена во Франции еще в 1966 г., она имела мощность 240 МВт. Эта электростанция работает и сегодня. В наше время приливные электростанции есть почти во всех уголках нашей планеты.

Страны, расположенные в районах вулканической активности, могут использовать *геотермальную энергию* (энергию горячей воды, сухого и влажного пара, поднимающихся из недр Земли близко к поверхности). Геотермальную энергию активно используют, например, в Исландии (рис. 12), на Филиппинах (27 % производства электроэнергии страны), в Мексике, США.



**Рис. 10.** Одна из крупнейших солнечных электростанций в мире — «Айванпа» (США, Калифорния). 173 тыс. зеркал отражают солнечный свет и направляют его на вершины трех башен, где установлены котлы с водой. Горячий пар поступает на лопасти турбин, установленных в башнях



**Рис. 11.** Ветрогенераторы, установленные вдоль побережья Дании, полностью удовлетворяют нужды севера страны в энергии и позволяют поставлять электроэнергию другим странам



**Рис. 12.** Теплоснабжение столицы Исландии Рейкьявика полностью осуществляется от геотермальной станции, расположенной в 7 км от города



### Подводим итоги

Быстрое развитие техники, повсеместное использование синтетических материалов, сжигание огромного количества углеводородного топлива приводят к ухудшению экологической ситуации на нашей планете. Самое большое загрязнение окружающей среды происходит из-за человека (антропогенное загрязнение). Его деятельность приводит к образованию островов мусора в океане (механическое загрязнение), дополнительным выбросам тепла в атмосферу и водоемы (тепловое загрязнение), существенному повышению радиационного фона (радиационное загрязнение). На здоровье человека влияет также увеличение уровня шума (шумовое загрязнение) и концентрации электромагнитного излучения (электромагнитное загрязнение).

Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере Земли уже привело к тому, что средняя температура планеты повысилась на 0,7 °С. Чтобы уменьшить количество выбросов и хотя бы частично сохранить запасы полезных ископаемых, правительства стран поддерживают использование альтернативных источников энергии, а именно энергии Солнца и ветра, приливов и отливов, ядерной и геотермальной энергий.

## ПРЕФИКСЫ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ НАЗВАНИЙ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

Префикс	Символ	Множитель	Префикс	Символ	Множитель
тера-	Т	$10^{12}$	санти-	с	$10^{-2}$
гига-	Г	$10^9$	милли-	м	$10^{-3}$
мега-	М	$10^6$	микро-	мк	$10^{-6}$
кило-	к	$10^3$	нано-	н	$10^{-9}$
гекто-	г	$10^2$	пико-	п	$10^{-12}$
деци-	д	$10^{-1}$	фемто-	ф	$10^{-15}$

## ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ И ЗАДАНИЯМ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### Раздел I «Магнитное поле»

**№ 1.** 1. Слева — южный, справа — северный. 2. Постоянные магниты имеют два полюса. 4. *Подсказка:* проводники, в которых текут токи одного направления, притягиваются.

**№ 2.** 1. Для рис. *а:* 1) однородное, 2) *A* и *B* — вверх, 3) одинакова в точках *A* и *B*; для рис. *б:* 1) однородное, 2) *A* и *B* — к нам, 3) одинакова в точках *A* и *B*; для рис. *в:* 1) неоднородное, 2) *A* — влево вверх, *B* — слева направо. 3. 1) Да; 2) *B* — влево вверх, *C* — влево вниз; 3) в точке *C*; 4) от *S* до *N*.

**№ 3.** 1. От *B* к *A*. 2. 1) против хода часовой стрелки; 2) от нас; 3) *a* — одинаковое, *б* — в точке *A*. 3. Южным; да. 4. Опустится. 5. Слева «+», справа «-».

**№ 4.** 1. а) вверх; б) слева направо; в) слева направо; г)  $F_A = 0$ . 2. 1,08 Н; 0. 3. а) внизу — северный; б) слева — положительный. 4. а) 1,2 м; б) 30 мН. 6. а) слева направо; б) 0,25.

**№ 5.** 1. Магнитожесткая. 2. а) свойства парамагнетиков; б) свойства ферромагнетиков. 3. Незначительно уменьшилось. 5. Поместить в мощное магнитное поле.

**№ 6.** 1. Он останется намагниченным после отключения тока; будет расходоваться дополнительная энергия на перемагничивание. 2. Слева — северный полюс. 3. К *B* и *C*. 4. Увеличится.

**№ 7.** 1. По ходу часовой стрелки. 2. Сопротивление вольтметра огромно. 3. Прибор выйдет из строя.

**№ 8.** 1. Если ток во внешней катушке изменяется. 2. 1) а) оттолкнется от магнита; б) притянется; в) оттолкнется; 2) Ток направлен по передней стенке: а) вниз; б) вверх; в) вверх. Направление индукции магнитного поля: а) слева направо; б) справа налево; в) справа налево; 3) Кольцо останется неподвижным. 3. По передней стенке катушки: 1) вниз, 2) вверх, 3) вниз, 4) вверх.

### Задания для самопроверки к разделу I

1. а. 2. в. 3. 1—В, 2—Б, 3—А, 4—Д. 4. а, в. 5. в. 6. б. 7. а. 8. Чтобы отделить металлические предметы. 9. Справа «+». 10. Справа «+». 11. Вверху — северный. 12. Железный — да; медный — нет. 13. Внизу — северный; уменьшится. 14. По передней стенке катушки вниз. 15. 0,7 Н.

## Раздел II «Световые явления»

**№ 9.** 1. 1—Г, 2—В, 3—Б. 2. а) Луна; б) экран компьютера; в) радиояркая. 3. 8 мин 20 с. 4. б, в. 5.  $9,46 \cdot 10^{12}$  км.

**№ 10.** 3. 1—Г, 2—В, 3—Б. 4. 67 см. 9.  $c=10$  см,  $b=8,7$  см.

**№ 11.** 1. 3 м. 4.  $40^\circ$ . 5. 60 см; 80 см. 6. 8 км/ч; на 4 м. 7.  $18^\circ$ .

**№ 12.** 2.  $1,24 \cdot 10^8$  м/с;  $2,26 \cdot 10^8$  м/с;  $3 \cdot 10^8$  м/с. 3.  $40^\circ$ . 5. 4 мкс. 7. 1) Среда 2; 2) 1,5; 3)  $1,7 \cdot 10^8$  м/с; 4) 1,2; 2.

**№ 13.** 1. Черными; зеленым. 2. Синего; все, кроме синего. 3. Фиолетового. 4. Красного.

**№ 14.** 1. Первая линза рассеивающая, вторая — собирающая. 2. Первая. 3. 62,5 см, рассеивающая. 6. Собрать. 7.  $S_1A_1=1,2$  см;  $OF=3,75$  см.

**№ 15.** 2. 40 см. 3. -3 дптр, рассеивающая. 5. 1) 5 дптр; 2) 10 см. 7. 25 дптр.

**№ 16.** 1. 40 см, близорукость. 2. 12,5 см. 5. -1 дптр.

### Задания для самопроверки к разделу II

1. а. 2. б. 3. г. 4. б. 5. в. 6. в. 7. а. 8. в. 9. 4 м/с. 10.  $20^\circ$ . 11. 1,4. 12. 1 м. 13. 1—А, 2—В, 3—Г. 14. Собирающая, 50 см, +2 дптр. 15. Абсолютные показатели склеры человека и рыбы почти одинаковы, но в глаз рыбы свет попадает из воды, поэтому преломляется меньше. 16. 5 см.

## Раздел III «Механические и электромагнитные волны»

**№ 17.** 1. а) 2,5 см; б) 4 см. 2. 20 м/с. 3. Нет. 4. Не возникают силы упругости. 5. 45 км. 6. а) влево; б) вправо. 7. Для рис. а: 1) 40 см, 0,067 с, 1,6 м; 2) А и С — вверх, В — не движется; 3) 450. Для рис. б: 1) 20 см, 0,05 с, 2 м; 2) А — вверх, В — вниз, С — не движется; 3) 600. 8. 3,2 м/с.

**№ 18.** 1. Да. 2. Частота взмахов крыльев бабочки меньше  $20 \text{ с}^{-1}$ . 3. 8,5 см; 37,5 см; 1,25 м. 5. 3 км. 6. 1700. 7. На 2,6 с. 10. 72 мкс.

**№ 19.** 1. 1) а, б, в; 2) а, б. 2. Провод:  $\lambda=6000$  км,  $v=3 \cdot 10^8$  м/с; радиопередатчик:  $v=3 \cdot 10^9$  Гц;  $v=3 \cdot 10^8$  м/с; излучатель:  $v=2 \cdot 10^{14}$  Гц;  $v=3 \cdot 10^8$  м/с. 3. а) 750 нм, 400 нм; б) 457 нм, 240 нм. 5.  $0,5 \text{ с}^{-1}$ ; 2 с.

**№ 20.** 1. 4, 2, 1, 3. 2. 1—Д, 2—В, 3—Г, 4—А. 3.  $5,3 \cdot 10^{14}$  Гц. 4. 100 мкм; оптический диапазон (инфракрасное излучение). 6. 0,4 с.

**№ 21.** 1. 3 км. 2. 0,5 м.

### Задания для самопроверки к разделу III

1. б. 2. г. 3. а. 4. б. 5. г. 6. в. 7. а. 8. б. 9. 300 м. 10. 1—В, 2—Б, 3—Г. 11. Вверх. 12. На 2 с. 13. Тон звука становится выше. 14. 4 м; 17,6 м. 15. 0,42 Гц; 48 м. 16. 4 м; 50 МГц.

## Раздел IV «Физика атома и атомного ядра. Физические основы атомной энергетики»

**№ 22.** 1.  $Z=18$ ,  $N=22$ . 2. Количеством нейтронов. 3. 5; 11. 4. Sb. 5.  $2 \cdot 10^4$  Н.

**№ 23.** 1. а)  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение; б)  $\gamma$ -излучение. 2.  $12 \cdot 10^{18}$  Гц. 4. На ядро  ${}^{228}_{89}\text{Ac}$ . 5.  $6,8 \cdot 10^{-27}$  кг;  $7,7 \cdot 10^{-13}$  Дж. 7.  $12,04 \cdot 10^{23}$ .

**№ 24.** 1. Уран-235; Радон-220. 2.  $\approx 7,2 \cdot 10^{17}$ . 3. В 8 раз. 4. 0,6 с. 5.  $3,7 \cdot 10^{20}$  Бк.

**№ 25.** 2.  $7,2 \cdot 10$  мкГр. 3. 16,6 Зв. 4. 90 мкЗв.

**№ 26.** 1. 234 МДж; 2,34 кг. 2. 82 ГДж. 3.  $\approx 17\%$ .

**№ 27.** 1. 32 %. 2.  $69 \cdot 10^6$  кВт·ч. 3. 432 ТДж. 4.  $\approx 16$  кг.

### Задания для самопроверки к разделу IV

1. б. 2. б. 3. г. 4. а. 5. б. 6. б. 7. г. 8. б. 9. 1—Д, 2—Г, 3—В, 4—Б. 10. в. 11.  ${}^{214}_{84}\text{Po}$ . 12.  $2 \cdot 10^9$ . 13. 1644. 14. 10,4 мГр (безопасно). 15.  ${}^{225}_{88}\text{Ra}$ . 16. 8,4 кг.

## Раздел V «Движение и взаимодействие. Законы сохранения»

**№ 28.** 1. Да. 2.  $1,5 \text{ м/с}^2$ . 3.  $1 \text{ м/с}$ ;  $0$ ;  $-1 \text{ м/с}$ . 4.  $0$ . 5.  $20 \text{ с}$ . 6. а)  $2 \text{ м/с}$ ,  $1 \text{ м/с}^2$ , нет; б)  $-20 \text{ м/с}$ ,  $5 \text{ м/с}^2$ ,  $4 \text{ с}$ ; в)  $10 \text{ м/с}$ ,  $-3 \text{ м/с}^2$ ,  $\approx 3,3 \text{ с}$ . 7. 1)  $v_x = -4 + 2t$ ; 2)  $v_x = 8 - 4t$ . 8. 1)  $v_x = 2 + 1,5t$ ; 2)  $v_x = -3 + t$ ; 3)  $v_x = 1$ ;  $v_x = 5 - 2t$ . 9. За  $4 \text{ с}$  до начала наблюдения. 10.  $30 \text{ м}$ .

**№ 29.** 1.  $35 \text{ м}$ . 2.  $100 \text{ м}$ . 3.  $1,8 \text{ с}$ ;  $\approx 4,4 \text{ м/с}^2$ . 4. 1) б)  $x_{01} = 8 \text{ м}$ ,  $x_{02} = -2 \text{ м}$ ; в)  $v_{01x} = -2 \text{ м/с}$ ,  $v_{02x} = -5 \text{ м/с}$ ; 2)  $a_{1x} = 2 \text{ м/с}^2$ ,  $a_{2x} = 4 \text{ м/с}^2$ ; 2)  $5 \text{ с}$ ,  $23 \text{ м}$ ; 3)  $v_{1x} = -2 + 2t$ ,  $v_{2x} = -5 + 4t$ ;  $s_{1x} = -2t + t^2$ ,  $s_{2x} = -5t + 2t^2$ . 5.  $l = 40 \text{ м}$ ,  $s = 0$ ;  $x = -20 + 20t - 5t^2$ . 6.  $40 \text{ с}$ . 7.  $x = 10 + 8t - 0,8t^2$ . 8. Да, если будет двигаться на эскалаторе вниз со скоростью  $2,5 \text{ м/с}$ ; да.

**№ 30.** 1. На стул —  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ,  $\vec{P}$ ,  $\vec{N}$ ; на человека —  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ ,  $\vec{N}$ ; действия скомпенсированы. 2. Воды, весел, Земли. 3. Да; да; нет. 4. 2)  $0$ ;  $18 \text{ м/с}$ ; 3)  $2 \text{ м/с}^2$ ,  $2 \text{ м/с}^2$ . 6. а)  $2 \text{ Н}$ ; б)  $0$ .

**№ 31.** 1.  $2,5 \text{ кН}$ . 2. По направлению движения; против направления движения. 3.  $5 \text{ м/с}^2$ , на восток. 4.  $2,5 \text{ т}$ . 5.  $3 \text{ м/с}^2$ . 7. Оба; девочка.

**№ 32.** 1.  $10 \text{ Н}$ . 2. Одинаково. 3.  $0,5 \text{ м/с}^2$ . 4. Нет,  $F_{\text{нат}} = 200 \text{ Н}$ ; да,  $F_{\text{нат}} = 400 \text{ Н}$ .

**№ 33.** 1.  $4,7 \text{ кг}$ ;  $47 \text{ Н}$ . 2. Нет. 3. Увеличится в 2 раза. 4.  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ . 5.  $0,625 \text{ м/с}^2$ . 6.  $4,9 \text{ м/с}^2$ . 7.  $5 \text{ м/с}$ ,  $10 \text{ м/с}^2$ ;  $0,5 \text{ с}$ .

**№ 34.** 1. Ускорения одинаковы. 2. Все тела движутся с одинаковым ускорением  $\vec{g}$ ; а) траектория движения — часть параболы; б) тело движется вертикально вверх, потом изменяет направление движения на противоположное; в) тело движется вертикально вниз. 3. а)  $10 \text{ м/с}$ ,  $15 \text{ м}$ ; б)  $2 \text{ с}$ ,  $20 \text{ м}$ . 4.  $3 \text{ с}$ ,  $60 \text{ м}$ ,  $75 \text{ м}$ . 5.  $0,4 \text{ с}$ . 6.  $10 \text{ м/с}^2$ ; 7.  $35 \text{ м}$ . 9. 1 — А, 2 — Д, 3 — В, 4 — Б.

**№ 35.** 1.  $3,5 \text{ кН}$ . 2.  $0,5$ . 3.  $48 \text{ Н/м}$ . 4.  $110 \text{ Н}$ , если ускорение направлено вверх,  $70 \text{ Н}$  — если вниз. 5.  $15 \text{ Н}$ ;  $0,025$ . 6.  $0,9 \text{ м/с}^2$ . 7.  $\approx 0,06$ .

**№ 36.** 1. а)  $18 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ; б)  $0$ ; в)  $40,5 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . 2.  $25 \text{ м/с}$ . 4. а)  $4 \text{ м/с}$ ; б)  $1 \text{ м/с}$ ; в)  $1,75 \text{ м/с}$ . 5.  $1,4 \text{ м}$ .

**№ 37.** 1. Да. 2.  $1 \text{ кН}$ . 3.  $2,7 \text{ км/с}$ .

**№ 38.** 1. 1)  $168 \text{ кДж}$ ; 2)  $8 \text{ кДж}$ ; 3)  $160 \text{ кДж}$ . 2.  $12 \text{ м/с}$ . 3. 1)  $2 \text{ м/с}$ ; 2)  $0,5 \text{ м/с}$ ; 3)  $1,25 \text{ см}$ . 4.  $12,8 \text{ см}$ .

**№ 39.** 1. В лампе накаливания только  $5\%$  электрической энергии преобразуется в энергию света, остальная — во внутреннюю энергию. 4.  $15\%$ . 5. Поглотилось то же количество энергии.

### Задания для самопроверки к разделу V

1. б. 2. г. 3. в. 4. б. 5. а. 6. в. 7. а. 8.  $100 \text{ м/с}^2$ . 9.  $30 \text{ м}$ . 10.  $t_1 = 2 \text{ с}$ ,  $t_2 = 1 \text{ с}$ ;  $20 \text{ м/с}$ . 11.  $240 \text{ Н}$ ,  $160 \text{ Н}$ . 12. 1 — Г, 2 — Д, 3 — А, 4 — Б. 13.  $\approx 0,25$ . 14.  $1 \text{ с}$ ;  $5 \text{ м}$ . 15.  $h = R/4$ .

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

**А** Адаптация глаза 100  
Аккомодация 101  
Активность радионуклидного образца 158

**Б** Беккерель 158

**В** Взаимодействие  
— гравитационное 209, 245  
— сильное 149, 245  
— слабое 245  
— электромагнитное 245  
Волна  
— звуковая 118  
— механическая 112  
— поперечная 113

— продольная 113  
— электромагнитная 127  
Вселенная 243

**Г** Гипотеза Ампера 26  
Глаз 100  
Грей 163  
Громкоговоритель электродинамический 37  
Громкость звука 120

**Д** Движение  
— механическое 186  
— равноускоренное  
прямойлинейное 188  
— реактивное 231

- Диамagnetики 24
- Дисперсия 86
- Длина волны 115
- Доза ионизирующего излучения
  - поглощенная 163
  - эквивалентная 164
- Дозиметр 166
- З** Закон(ы)
  - всемирного тяготения 210
  - инерции 199
  - Ньютона
  - — второй 203
  - — первый 201
  - — третий 206
  - отражения света 68
  - преломления света 76
  - прямолинейного распространения света 62
  - сохранения импульса 228
  - сохранения механической энергии 236
  - сохранения энергии 247
- Зиверт 164
- И** Излучение
  - альфа ( $\alpha$ ) 153
  - бета ( $\beta$ ) 153
  - гамма ( $\gamma$ ) 133, 153
  - инфракрасное 132
  - рентгеновское 133
  - ультрафиолетовое 133
- Изображение
  - в линзе 94, 95
  - в плоском зеркале 69
- Изотопы 149
- Импульс тела 227
- Индукционный ток 41
- Инерциальная система отсчета 200
- Инерция 199
- Инфразвук 121
- Источник света 56
  - точечный 58
- К** Коллектор 35
- Кюри 158
- Л** Линза 89
  - рассеивающая 90, 95
  - собирающая 90, 94
- Линии магнитной индукции 11
- М** Магнит постоянный 6
- Магнитная индукция 10, 20
- Магнитный полюс 6
- Н** Нуклид 149
- О** Оптическая плотность среды 76
- Оптическая сила линзы 91
- Опыт(ы)
  - Ампера 7
  - Резерфорда 146
  - Фарадея 39
  - Эрстеда 7
- П** Парамагнетики 25
- Перемещение 187, 192
- Период полураспада 157
- Показатель преломления 77
- Поле
  - гравитационное 209
  - Земли 12
  - магнитное 8
  - однородное 12
  - электромагнитное 126
- Правило
  - буравчика 16
  - левой руки 20
- Р** Радиоактивность 152, 154
- Радиоволны 132
- Радиолокация 136
- С** Свободное падение 212
- Связь сотовая 135
- Сила
  - Ампера 19
  - тяжести 211
- Скорость мгновенная 189
- Т** Температура Кюри 6, 26
- Тень 62
- Термоядерный синтез 171
- Тесла 10, 20
- У** Ультразвук 121
- Ускорение 187
  - свободного падения 213
- Ф** Ферромагнетики 25
- Фокусное расстояние 91
- Формула волны 115
- Формула тонкой линзы 96
- Ч** Число
  - зарядовое (протонное) 148
  - нуклонное (массовое) 148
- Ш** Шкала электромагнитных волн 131
- Э** Электрический двигатель 35
- Электромагнит 29
- Электромагнитная индукция 41
- Электромагнитический генератор 42
- Энергия 235
  - механическая 235
- Эхо 121
- Эхолокация 122
- Я** Ядерная реакция цепная 169
- Ядерные силы 149
- Ядерный реактор 170
- Ядерный цикл 174



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
------------------	---

### Раздел I. Магнитное поле

§ 1. Магнитные явления. Опыт Эрстеда. Магнитное поле.....	6
§ 2. Индукция магнитного поля. Линии магнитной индукции. Магнитное поле Земли .....	10
§ 3. Магнитное поле тока. Правило буравчика.....	15
§ 4. Сила Ампера.....	19
§ 5. Магнитные свойства веществ. Гипотеза Ампера.....	24
§ 6. Электромагниты и их применение .....	28
Лабораторная работа № 1.....	32
§ 7. Электродвигатели. Электроизмерительные приборы. Громкоговоритель .....	34
§ 8. Опыты Фарадея. Явление электромагнитной индукции. Индукционный электрический ток .....	39
Лабораторная работа № 2.....	45
Подводим итоги раздела I .....	48
Задания для самопроверки к разделу I .....	50
Энциклопедическая страница .....	52
Ориентировочные темы проектов. Темы рефератов и сообщений.	
Темы экспериментальных исследований.....	54

### Раздел II. Световые явления

§ 9. Световые явления. Источники и приемники света. Скорость распространения света.....	56
§ 10. Световой луч и световой пучок. Закон прямолинейного распространения света. Солнечное и лунное затмения.....	61
§ 11. Отражение света. Законы отражения света. Плоское зеркало.....	67
Лабораторная работа № 3.....	73
§ 12. Преломление света на границе раздела двух сред. Законы преломления света ..	75
Лабораторная работа № 4.....	83
§ 13. Спектральный состав естественного света. Цвета .....	85
§ 14. Линзы. Оптическая сила линзы .....	89
§ 15. Построение изображений в линзах. Некоторые оптические устройства. Формула тонкой линзы.....	93
Лабораторная работа № 5.....	99
§ 16. Глаз как оптическая система. Дефекты зрения и их коррекция .....	100
Подводим итоги раздела II .....	104
Задания для самопроверки к разделу II .....	106
Энциклопедическая страница .....	108
Ориентировочные темы проектов. Темы рефератов и сообщений.	
Темы экспериментальных исследований.....	110

### Раздел III. Механические и электромагнитные волны

§ 17. Возникновение и распространение механических волн. Физические величины, характеризующие волны .....	112
§ 18. Звуковые волны. Инфразвук и ультразвук .....	118
Лабораторная работа № 6.....	124
§ 19. Электромагнитное поле и электромагнитные волны .....	126
§ 20. Шкала электромагнитных волн .....	130
§ 21. Физические основы современных беспроводных средств связи. Радиолокация.....	135
Энциклопедическая страница .....	139
Подводим итоги раздела III .....	140
Задания для самопроверки к разделу III .....	142

Ориентировочные темы проектов. Темы рефератов и сообщений.	
Темы экспериментальных исследований. ....	144

## **Раздел IV. Физика атома и атомного ядра.**

### **Физические основы атомной энергетики**

§ 22. Современная модель атома. Протонно-нейтронная модель ядра атома. Ядерные силы. Изотопы .....	146
§ 23. Радиоактивность. Радиоактивные излучения .....	151
§ 24. Активность радиоактивного вещества. Применение радиоактивных изотопов .....	157
§ 25. Ионизирующее действие радиоактивного излучения. Естественный радиоактивный фон. Дозиметры .....	163
§ 26. Цепная ядерная реакция. Ядерный реактор .....	168
§ 27. Атомная энергетика Украины. Экологические проблемы атомной энергетики .....	174
Подводим итоги раздела IV .....	178
Задания для самопроверки к разделу IV .....	180
Энциклопедическая страница .....	182
Ориентировочные темы проектов. Темы рефератов и сообщений. ....	184

## **Раздел V. Движение и взаимодействие. Законы сохранения**

§ 28. Равноускоренное прямолинейное движение. Ускорение. Скорость равноускоренного прямолинейного движения .....	186
§ 29. Перемещение при равноускоренном прямолинейном движении. Уравнение координаты .....	192
§ 30. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона .....	199
§ 31. Второй закон Ньютона .....	203
§ 32. Третий закон Ньютона .....	206
§ 33. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Ускорение свободного падения ..	209
§ 34. Движение тела под действием силы тяжести .....	215
§ 35. Движение тела под действием нескольких сил .....	221
§ 36. Взаимодействие тел. Импульс. Закон сохранения импульса .....	226
§ 37. Реактивное движение. Физические основы ракетной техники .....	231
§ 38. Применение законов сохранения энергии и импульса в механических явлениях .....	235
<i>Лабораторная работа № 7.</i> .....	241
§ 39. Фундаментальные взаимодействия в природе. Фундаментальный характер законов сохранения .....	243
§ 40. Эволюция физической картины мира. Физика и научно-технический прогресс. ....	250
Энциклопедическая страница .....	255
Подводим итоги раздела V .....	256
Задания для самопроверки к разделу V .....	258
Ориентировочные темы проектов. Темы рефератов и сообщений.	
Темы экспериментальных исследований. ....	260
Физика и экология. Альтернативные источники энергии. ....	261
<i>Префиксы для образования названий кратных и дольных единиц</i> .....	266
<i>Ответы к упражнениям и заданиям для самопроверки</i> .....	266
<i>Алфавитный указатель</i> .....	268

*Рубрика «Физика и техника в Украине»:* Институт магнетизма НАН и МОН Украины (9); А. И. Ахиезер (18); Киевский национальный университет (88); Институт физики НАНУ (92); А. Т. Смакула (103); Б. П. Грабовский (123); И. П. Пулюй (156); ННЦ «Харьковский физико-технический институт» (162); Институт ядерных исследований НАНУ (173); Одесский национальный политехнический университет (214); А. Ф. Иоффе (220); К. Д. Синельников (230); С. П. Королев (234); В. М. Глушков (249); Б. И. Веркин (254).

## 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 Яківна  
КІРЮХІНА Олена Олександрівна*

### «ФІЗИКА»

**підручник для 9 класу загальноосвітніх навчальних закладів  
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. Морева*. Редактор *О. В. Костіна*.  
Художнє оформлення *В. І. Труфен*. Технічний редактор *А. В. Плisko*.  
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 15.07.2017. Формат 70×100/16.  
Папір офсетний. Гарнітура Шкільна. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 22,10. Обл.-вид. арк. 28,73. Тираж 40 121 прим. Зам. № 154-07

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) 701-11-22, 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